

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí

Analýza dynamických účinků lávky  
Analysis of footbridge dynamic effects

Student:

Bc. Václav Petráš

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Ostrava 2017

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Václav Petráš**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb

Téma: **Analýza dynamických účinků lávky**  
**Analysis of footbridge dynamic effects**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Legislativa návrhu a diagnostiky dřevěných mostů a lávek.
2. Teoretický rozbor zvolené konstrukce a volba diagnostických metod.
3. Statický a dynamický výpočet zvolené lávky.
4. Získání reálných dat z měření vybrané konstrukce.
5. Vyhodnocení a návrh opatření (doporučení).

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí.
- [2] ČSN EN 1991-1-4: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná pravidla zatížení – Zatížení větrem.
- [3] ČSN EN 1995-1-1: Navrhování dřevěných konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [4] ČSN 01 3467 Výkresy inženýrských staveb. Výkresy mostů. 01/87.
- [5] ČSN 73 6200 Mostní názvosloví. 01/77, Změna a-5/77, Změna b-4/83.
- [6] ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů. 02/95. Změna 1-5/96.
- [7] ČSN 73 6203 Zatížení mostů. 09/87, Změna a)-08/88, Změna b-11/89.
- [8] ČSN 73 6209 Zatěžovací zkoušky mostů. 02/96.
- [9] ČSN 73 6212 Navrhování dřevěných mostních konstrukcí. 10/95.
- [10] ČSN 73 6221 Prohlídky mostů pozemních komunikací. 07/96.
- [11] ČSN EN 1995-2 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 2: Mosty
- [12] Koželouh, K.: Navrhování, výpočty a posouzení dřevěných stavebních konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ISBN:978-80-87093-73-3.
- [13] Odborné časopisy – Konstrukce, Stavitel, Stahlbau
- [14] Internet (<http://www.mosty.cz/>)

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Fojtík, Ph.D.**

Datum zadání:

Datum odevzdání:

---

doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.  
*děkan fakulty*

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 01.12.2017

.....

podpis studenta

---

**Prohlašuji, že**

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 01. 12. 2017

**Anotace**

Bibliografická citace:

PETRÁŠ, Václav. Analýza dynamických účinků lávky: diplomová práce. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí, 2017. 54 s.

Předmětem této diplomové práce je analýza dynamických účinků dřevěné lávky přes silnici I58 na okraji obce Příbor. Cílem práce je statický a dynamický výpočet celé konstrukce včetně změření dynamické zatěžovací zkoušky reálné konstrukce a zhodnocení stavu celé konstrukce. Dále se konstrukce porovnala s vytvořeným MKP modelem, který dále sloužil pro podrobnější analýzu dynamických účinků lávky. Výsledkem diplomové práce je statické a dynamické posouzení celé konstrukce, dále vyhodnocení zatěžovací zkoušky a návrh doporučení pro zlepšení dynamického chování této lávky.

**Klíčová slova**

Dřevěná lávka, lepené lamelové dřevo, modely zatížení, dynamická zatěžovací zkouška, tlumič kmitání

**Annotation**

Bibliographic citation:

PETRÁŠ, Václav. Analysis of footbridge dynamic effects: Master's thesis. Ostrava: Technical university of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Construction, 2017. 54 p.

The subject of this thesis is an analysis of footbridge dynamic effects over road I58 on the outskirts of the city Příbor. The aim of this thesis is a static and dynamic analysis of the construction include a dynamic load test of the real footbridge for assessment of the condition of the structure. The footbridge was compared with created FEM model which was used for more detailed analysis of dynamic effects. The result of this thesis is static and dynamic analysis, measurement evaluation and suggest recommendation for better function of the footbridge.

**Key words**

Wooden footbridge, glued laminated timber, load models, dynamic load test, oscillating damping

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat Ing. Romanu Fojtíkovi, Ph.D za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této diplomové práce. Mé poděkování také patří Ing. Davidu Marečkovi, Ing. Pavlu Dobešovi a Ing. Lence Poništové za spolupráci při zatěžovací zkoušce lávky.



---

## Obsah

1. Úvod .....	1
2. Lávky – základní typy a rozdělení .....	2
2.1 Hlavní části lávek .....	2
2.2 Rozdělení lávek .....	2
2.3 Lávky deskové .....	4
2.4 Lávky trámové .....	4
2.4.1 Ocelové trámové lávky .....	4
2.4.2 Dřevěné trámové lávky .....	5
2.5 Lávky obloukové .....	6
2.6 Lávky rámové .....	7
2.7 Lávky visuté .....	8
2.8 Lávky zavěšené .....	8
3. Zásady navrhování a diagnostiky konstrukcí .....	10
3.1 Požadavky na stavební konstrukce .....	10
3.2 Návrhová životnost .....	10
3.3 Zásady navrhování dle mezních stavů .....	11
3.3.1 Mezní stav únosnosti .....	11
3.3.1 Mezní stav použitelnosti .....	12
3.4 Návrhy dřevěných konstrukcí dle ČSN EN 1995-1-1 .....	12
3.4.1 Třídy provozu a trvání zatížení .....	13
3.4.2 Návrhová hodnota vlastnosti materiálu .....	14
3.5 Základní diagnostika lávek a mostů .....	15
3.5.1 Druhy zatěžovacích zkoušek .....	15
3.5.2 Zásady a údaje o měření .....	15
3.5.3 Měřené veličiny .....	16
3.5.4 Uspořádání zátěže .....	17
3.5.5 Vyhodnocení dynamické zkoušky .....	17
3.6 Kritéria pohody chodců dle ČSN EN 1990 .....	18
3.7 Posouzení dle ČSN 73 6209 .....	19
3.7 Posouzení dle SÉTRA- Technical Guide footbridges .....	19
4. Zatížení mostů dopravou .....	20
4.1 Zatížení mostů pozemních komunikací .....	20

---

4.1.1 Model zatížení 1 (LM1) .....	20
4.1.2 Model zatížení 2 (LM2) .....	21
4.1.3 Model zatížení 3 (LM3) .....	21
4.1.3 Model zatížení 4 (LM4) .....	21
4.2 Zatížení chodníků, cyklistických stezek a lávek pro chodce .....	22
4.2.1 Svislá zatížení .....	22
4.2.3 Vodorovná zatížení dopravou .....	22
5. Popis konstrukce .....	23
5.1 Nosná konstrukce .....	24
6. Výpočet zatížení .....	28
6.1 Stálá zatížení .....	28
6.2 Zatížení lávky dopravou .....	28
6.3 Zatížení větrem .....	29
6.3.1 Zatížení větrem ve směru osy y .....	29
6.3.2 Zatížení větrem ve směru osy z .....	30
6.4 Zatížení teplotou .....	30
6.4.1 Rovnoměrná změna teploty .....	30
6.5 Přehled zatěžovacích stavů .....	31
7. Statické posouzení konstrukce .....	34
8. Experimentální měření konstrukce .....	35
8.1 Zatěžovací zkouška .....	38
8.1.1 Velikost budící síly .....	40
8.1.1 Průběh zatěžovací zkoušky .....	40
8.2 Výsledky dynamické zatěžovací zkoušky .....	42
9. Numerický model konstrukce .....	45
9.1 Porovnání vlastních frekvencí .....	49
10. Návrh opatření .....	50
10.1 Návrh aktivního tlumiče .....	50
11. Závěr .....	52
13. Seznam použité literatury .....	53
14. Seznam použitých programů .....	54
15. Seznam příloh .....	54
16. Seznam výkresové části .....	54

## Seznam použitého značení

- velká písmena latinské abecedy

$A$	plocha průřezu	$[\text{mm}^2]$
$A_v$	plocha průřezu ve střihu	$[\text{mm}^2]$
$E_{0,05}$	hodnota 5% kvantilu modulu pružnosti	$[\text{MPa}]$
$I_y$	moment setrvačnosti průřezu k ose y	$[\text{mm}^4]$
$I_z$	moment setrvačnosti průřezu k ose z	$[\text{mm}^4]$
$I_t$	moment setrvačnosti průřezu v kroucení	$[\text{mm}^4]$
$W_{y,el}$	elastický modul průřezu k ose y	$[\text{mm}^3]$
$W_{z,el}$	elastický modul průřezu k ose z	$[\text{mm}^3]$
$W_{y,pl}$	plastický modul průřezu k ose y	$[\text{mm}^3]$
$W_{z,pl}$	plastický modul průřezu k ose z	$[\text{mm}^3]$

- malá písmena latinské abecedy

$b$	šířka lávky	$[\text{m}]$
$l_{roz}$	rozpětí lávky	$[\text{m}]$
$l_{pol}$	rozpětí jednotlivých polí lávky	$[\text{m}]$
$f_{h,k}$	charakteristická pevnost dřeva v otláčení	$[\text{MPa}]$
$f_{c,0,k}$	charakteristická pevnost dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny	$[\text{MPa}]$
$f_{c,90,k}$	charakteristická pevnost dřeva v tlaku kolmo k vláknům	$[\text{MPa}]$
$f_{m,k}$	charakteristická pevnost dřeva v ohybu	$[\text{MPa}]$
$f_{t,0,k}$	charakteristická pevnost dřeva v tahu rovnoběžně s vlákny	$[\text{MPa}]$
$f_{t90,k}$	charakteristická pevnost dřeva v tahu kolmo k vláknům	$[\text{MPa}]$
$f_{v,k}$	charakteristická pevnost dřeva ve smyku	$[\text{MPa}]$

---

$f_{c,0,d}$	návrhová pevnost dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny	[MPa]
$f_{c,90,d}$	návrhová pevnost dřeva v tlaku kolmo k vláknům	[MPa]
$f_{m,d}$	návrhová pevnost dřeva v ohybu	[MPa]
$f_{t,0,d}$	návrhová pevnost dřeva v tahu rovnoběžně s vlákny	[MPa]
$f_{t,90,d}$	návrhová pevnost dřeva v tahu kolmo k vláknům	[MPa]
$f_{v,d}$	návrhová pevnost dřeva ve smyku	[MPa]
$k_{def}$	součinitel dotvarování	[-]
$k_{mod}$	modifikační součinitel zohledňující vliv trvání zatížení a vlhkosti	[-]
$w_{fin}$	konečný průhyb	[mm]
$w_{net,fin}$	čistý konečný průhyb	[mm]
$w_{inst}$	okamžitý průhyb	[mm]

- malá písmena řecké abecedy

$\gamma_M$	dílčí součinitel vlastnosti materiálu	[-]
$\rho$	měrná hmotnost dřeva	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	poměrné přetvoření	[-]
$\sigma_{c,0,d}$	návrhové napětí v tlaku rovnoběžně s vlákny	[MPa]
$\sigma_{t,0,d}$	návrhové napětí v tahu rovnoběžně s vlákny	[MPa]
$\sigma_{m,crit}$	kritické ohybové napětí	[MPa]
$\sigma_{m,y,d}$	návrhové napětí v ohybu k hlavní ose y	[MPa]
$\tau_{nav}$	návrhové smykové napětí	[MPa]

## 1. Úvod

Lávky zajišťují především vodorovnou komunikaci pro pěší a cyklisty. Lávky se mají navrhovat hospodárně, účelně a především bezpečně. Dalším neméně důležitým hlediskem při navrhování lávek je její vzhled a začlenění do okolní krajiny, proto u větších a náročnějších staveb je nevyhnutelná spolupráce se zkušeným architektem. Lávky především využívají osvědčených materiálů, jako je ocel, dřevo nebo v dnešní době také předpjatý beton, který je velice oblíbený pro mnoho architektů díky svému elegantnímu vzhledu.

Dřevo vždy patřilo na našem území mezi nejpoužívanější stavební materiály, díky relativně snadné dostupnosti a opracovatelnosti. S velkým rozvojem stavebních materiálů v posledních 50. letech se začalo dřevo využívat i pro složitější konstrukce, jako jsou haly, mosty a lávky. Mezi hlavní výhody dřeva patří vysoká pevnost při relativně nízké objemové hmotnosti.

Dřevěné lávky se používají pro přemostění menších rozpětí, ale s kombinací s ocelí můžeme dosáhnout velkých rozpětí. Využívají se hlavně v přírodě, kde působí více esteticky a ekologicky oproti jiným typům konstrukcí.

Lávka bude vycházet z podkladů, již realizované stavby, která se nachází v obci Příbor. Mezi nejzajímavější cíle této diplomové práce patří vyhodnocení a následné srovnání získaných dat, které by mohly ukázat nedostatky již zrealizované konstrukce.

## 2. Lávky – základní typy a rozdělení

Lávka je stavební konstrukce, která sloužící především pro pěší a cyklisty k překonání překážky v podobě pozemních komunikací, železničních tratí nebo vodní toků. Případně se lávky využívají pro převedení inženýrských sítí (například potrubí).

### 2.1 Hlavní části lávek

Každou lávku lze rozdělit na dvě hlavní části. První částí lávky je spodní stavba a druhou částí horní stavba. Horní stavba lávek se skládá z hlavní nosné konstrukce, mostovky, ztužení, ložisek a mostních závěrů. Spodní stavba se skládá z podpěr a základů. Krajní podpěry se nazývají opěry, vnitřní podpěry se nazývají pilíře. Úkolem základů je přenést zatížení z vrchní stavby do základové půdy. Podle tvaru rozdělujeme základy na plošné a hlubinné [1].

### 2.2 Rozdělení lávek

#### a) podle materiálu

- betonové
- ocelobetonové
- kamenné
- cihelné
- kovové
- dřevěné

#### b) podle druhů konstrukce

- pevné
- pohyblivé
- plovoucí

- c) podle doby trvání
  - dočasné, provizorní
  - rozebíratelné
  - trvalé
  
- d) podle geometrie v půdorysu
  - kolmé
  - šikmé
  
- e) podle průběhu trasy na mostě
  - lávky přímé
  - půdorysně zakřivené
  
- f) podle počtu polí
  - lávky o jednom poli
  - lávky o více polích
  
- g) podle statického působení nosné konstrukce
  - lávky deskové
  - lávky trámové
  - lávky obloukové
  - lávky rámové
  - lávky visuté
  - lávky zavěšené
  
- h) podle mostovky
  - s horní mostovkou
  - s dolní mostovkou
  - s mezilehlou mostovkou
  - s mostovkou zavěšenou

## 2.3 Lávky deskové

U těchto typů lávek je hlavní nosnou konstrukcí deska. Výhodou těchto lávek je většinou snadné vyztužení a poté betonáž desky. Nevýhodou je relativně velká hmotnost z důvodu nevyužití celého průřezu lávky. Staticky většinou působí jako prosté desky, anebo méně často mohou působit jako spojitě desky.



Obr. 1 Desková lávka

## 2.4 Lávky trémové

U trémových lávek je hlavní nosnou konstrukcí skupina trámů, které mohou být ocelové, ocelobetonové, nebo také dřevěné.

### 2.4.1 Ocelové trémové lávky

Hlavní nosnou konstrukcí jsou většinou dva ocelové nosníky, které přenášejí zatížení z mostovky přes ložiska do spodní stavby. Hlavní nosníky mohou být buď plnostěnné, nebo příhradové. Staticky většinou působí jako prosté nosníky, anebo méně často jako spojitě.





Obr. 2 Ocelová trémová lávka

#### 2.4.2 Dřevěné trémové lávky

Dřevěné trémové lávky (Obr. 3) jsou nejvíce používané pro konstrukce lávek a využívají se pro přemostění menších rozpětí. Pro větší rozpětí se využívají v kombinaci s ocelí, většinou jako zavěšené. Můžeme je nalézt hlavně v přírodě, kde působí esteticky a ekologicky.



Obr. 3 Dřevěná trémová lávka

## 2.5 Lávky obloukové

Obloukové lávky působí ve srovnání s ostatními typy lávek lehčeji a elegantněji. Mezi hlavní výhody obloukových lávek z hlediska statického je v jejich tvaru, který se volí podobný tvaru výslednice od vnějšího zatížení, proto je nejvýhodnější parabola. Hlavní nevýhody jsou náročnější výroba a montáž konstrukce. Z hlediska tlaků na opěry mohou být tzv. pravé oblouky, které vyvozují na podpory šikmé tlaky anebo nepravé oblouky, které vyvozují pouze svislé tlaky na opěry mostu. Z hlediska statického systému nosné konstrukce můžeme mít oblouky vetknuté (třikrát staticky neurčité), oblouky s jedním kloubem (dvakrát staticky neurčité), oblouky dvoukloubové (jedenkrát staticky neurčité) a oblouky trojkloubové (staticky určité) [1].





Obr. 4 Oblouková lávka

## 2.6 Lávky rámové

Rámové lávky (Obr. 5) jsou nejčastěji betonové. Ze statického hlediska můžeme rámy rozdělit na vetknuté - třikrát staticky neurčité, dvoukloubové - jedenkrát staticky neurčité a trojkloubové - staticky určité.



Obr. 5 Rámová lávka

## 2.7 Lávky visuté

Visuté lávky se používají pro překlenutí největších vzdáleností. Hlavní nosným prvkem je visutý pás, který je namáhán pouze tahem. Nosná lana můžou být ukotvena do základových bloků (pravé visuté lávky), anebo se kotví do vyztuženého nosníku (nepravé visuté lávky) [2].



Obr. 6 Visutá lávka

## 2.8 Lávky zavěšené

Hlavním nosným prvkem zavěšených lávek je trámový nosník, který je zavěšený na šikmých závěsech působících na podpory šikmými tahy. Závěsy s malým sklonem přenášejí malé síly a jsou subtilní a mohou se od vlastní tíhy prohýbat. Oproti visutým lávkám jsou lana k mostovce připojena šikmo, a proto vytvářejí dodatečné vodorovné síly. Při symetrickém

uspořádání závěsů na pylon se zatížení v něm vyrovná a ten potom nemá tendenci se naklánět [1].



Obr. 7 Zavěšená lávka

### 3. Zásady navrhování a diagnostiky konstrukcí

Norma ČSN EN 1990 je základní normou v soustavě Eurokódů a poskytuje především obecné zásady a požadavky na bezpečnost, použitelnost a trvanlivost stavebních konstrukcí. Norma se používá společně s dalšími Eurokódy ČSN EN 1991 až 1999 pro navrhování pozemních a inženýrských staveb.

#### 3.1 Požadavky na stavební konstrukce

Norma definuje čtyři základní požadavky, které musí splňovat každá stavební konstrukce:

- konstrukce musí být navržena a provedena tak, aby během své předpokládané životnosti odolala všem zatížením a vlivům, které se mohou vyskytnout během provádění a používání a dále sloužila požadovanému účelu.
- konstrukce musí být navržena a provedena tak, aby měla odpovídající únosnost, použitelnost a trvanlivost.
- konstrukce musí být navržena a provedena tak, aby v případě požáru měla po požadované dobu dostatečnou odolnost.
- konstrukce musí být navržena a provedena tak, aby nebyla poškozena jevy jako výbuch, náraz a následky lidských chyb

Všechny výše uvedené požadavky jsou si rovnocenné a musí je splňovat každá konstrukce navržená dle této normy. Cílem návrhu je spolehlivá konstrukce, která se dosáhne navrhováním podle norem ČSN EN 1990 až 1999 [5].

#### 3.2 Návrhová životnost

V [5] jsou uvedeny požadavky na návrhovou životnost staveb. Hodnoty návrhové životnosti stanovené pro Českou republiku jsou v Tab. 1. Tyto hodnoty životnosti se mohou



uplatnit při posuzování konstrukcí na únavu nebo stanovení korozních přídávku u konstrukcí z patinující oceli. Jednotlivé části konstrukce nemusejí mít stejnou návrhovou životnost.

Kategorie návrhové životnosti	Informativní návrhová životnost (v letech)	Příklady
1	10	dočasné konstrukce <sup>(1)</sup>
2	10 až 25	vyměnitelné konstrukční části, např. jeřábové nosníky, ložiska
3	15 až 30	zemědělské a obdobné stavby
4	50	budovy a další běžné stavby
5	100	monumentální stavby, mosty a jiné inženýrské konstrukce
<sup>(1)</sup> Konstrukce nebo jejich části, které mohou být demontovány s předpokladem dalšího použití, se nemají považovat za dočasné.		

Tab. 1 Informativní návrhové životnosti

### 3.3 Zásady navrhování dle mezních stavů

Při navrhování stavebních konstrukcí podle norem ČSN EN 1990 až 1999 se uplatňuje metodika mezních stavů. Mezní stav je definován jako stav konstrukce, při jehož překročení již posuzovaná konstrukce nesplňuje příslušná návrhová kritéria. Rozlišují se dvě základní skupiny mezních stavů:

- mezní stav únosnosti
- mezní stav použitelnosti

#### 3.3.1 Mezní stav únosnosti

Mezní stav únosnosti se vztahuje ke zřícení konstrukce nebo ke vzniku poruchy, jež může ohrozit bezpečnost lidí nebo konstrukce [5]. Musí se ověřovat následující mezní stavy únosnosti:

- ztráta statické rovnováhy nebo její části
- porušení konstrukce nebo její části nadměrným přetvořením nebo porušení lomem
- ztráta stability nebo její části, včetně podpěr a základů
- vznik mechanismu z konstrukce nebo z její části
- porucha vyvolaná únavou nebo jinými časově závislými jevy.

### 3.3.1 Mezní stav použitelnosti

Mezní stav použitelnosti se vztahuje k funkci konstrukce nebo nosných prvků za běžného užívání a k pohodě osob [5]. Norma ČSN EN 1990 rozlišuje mezi nevratnými a vratnými mezními stavy použitelnosti. Při ověřování mezního stavu použitelnosti se má vycházet z kritérií a požadavků týkajících se následujících hledisek:

- hledisko deformací, které ovlivňují vzhled konstrukce, pohodu uživatelů a provozuschopnost konstrukce
- hledisko kmitání, které způsobují nepohodu osob nebo omezují funkční způsobilost konstrukce
- poškození, která mohou nepříznivě ovlivnit vzhled, trvanlivost nebo provozuschopnost konstrukce.

### 3.4 Návrhy dřevěných konstrukcí dle ČSN EN 1995-1-1

EN 1995 se používá pro navrhování pozemních a inženýrských staveb dřeva (rostlého dřeva, lepeného lamelového dřeva, apod.) nebo desek na bázi dřeva spojovaných pomocí lepidel nebo mechanických spojovacích prostředků. Zahrnuje zásady a požadavky na bezpečnost a použitelnost konstrukcí.



### 3.4.1 Třídy provozu a trvání zatížení

Dřevo jako organický materiál ovlivňují dva faktory, a to třída provozu konstrukce a trvání zatížení.

Třída provozu konstrukce souvisí především s vlhkostí prostředí, která ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva. Jednotlivé třídy prostředí se odlišují vlhkostí prostředí, od které se odvíjí i vlhkost dřeva.

<i>třída provozu</i>	<i>charakteristika třídy provozu</i>
<i>1</i>	<i>vlhkost materiálu odpovídající teplotě 20°C (u většiny jehličnatých dřevin nepřesahuje průměrná vlhkost 12%) relativní vlhkosti vzduchu přesahující 65% pouze několik týdnů v roce</i>
<i>2</i>	<i>vlhkost materiálu odpovídající teplotě 20°C (u většiny jehličnatých dřevin nepřesahuje průměrná vlhkost 20%) relativní vlhkosti vzduchu přesahující 65% pouze několik týdnů v roce</i>
<i>3</i>	<i>klimatické podmínky vedoucí k vyšší vlhkosti než ve třídě 2</i>

Tab. 2 Třídy provozu

Třídy trvání zatížení jsou zejména charakterizovány délkou působení zatížení na konstrukci po její dobu životnosti. Při návrhu je nutné konstrukci zařadit do jedné z pěti tříd trvání zatížení. Zároveň, jestliže se kombinace zatížení skládá ze zatížení příslušejících k různým třídám trvání zatížení, má se zvolit hodnota  $k_{\text{mod}}$ , která odpovídá zatížení s nejkratší dobou trvání [10].

<i>třída trvání zatížení</i>	<i>řád souhrnného trvání charakteristického zatížení</i>
<i>stálé</i>	<i>&gt; 10 let</i>
<i>dlouhodobé</i>	<i>6 měsíců - 10 let</i>
<i>střednědobé</i>	<i>1 týden - 6 měsíců</i>
<i>krátkodobé</i>	<i>&lt; 1 týden</i>
<i>okamžikové</i>	

Tab. 3 Třídy trvání zatížení

### 3.4.2 Návrhová hodnota vlastnosti materiálu

Návrhová hodnota  $X_d$  pevnostní vlastnosti se počítá dle vztahu [10]:

$$X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (1)$$

kde  $X_k$  je charakteristická hodnota pevnostní vlastnosti

$k_{mod}$  je modifikační součinitel zohledňující vliv trvání a vlhkost konstrukce

$\gamma_m$  je součinitel vlastnosti materiálu

Základní kombinace:	
Rostlé dřevo	1,3
Lepené lamelové dřevo	1,25
LVL, překližka, OSB	1,2
Třískové desky	1,3
Vláknité desky, tvrdé	1,3
Vláknité desky, středně tvrdé	1,3
Vláknité desky, MDF	1,3
Vláknité desky, měkké	1,3
Spoje	1,3
Kovové desky s prolisovanými trny	1,25
Mimořádné kombinace	1,0

Tab. 4 Doporučené součinitele  $\gamma_m$  pro vlastnosti materiálu

Návrhové tuhostní vlastnosti prvku se vypočítají dle vztahu:

$$E_d = \frac{E_{mean}}{\gamma_M} \quad (2)$$

$$G_d = \frac{G_{mean}}{\gamma_M} \quad (3)$$

kde  $E_{mean}$  je průměrná hodnota modulu pružnosti

$G_{mean}$  je průměrná hodnota modulu pružnosti ve smyku

$\gamma_m$  je součinitel vlastnosti materiálu

### 3.5 Základní diagnostika lávek a mostů

Účelem diagnostiky lávek a mostů je získat podklady pro ověření:

- statické, popř. dynamické funkce zkoušené konstrukce
- spolehlivosti konstrukce v mezních stavech použitelnosti
- výpočtových modelů a uvažovaných vstupních charakteristik výpočtu

#### 3.5.1 Druhy zatěžovacích zkoušek

Podle způsobu a druhu zatížení se zkoušky dělí na:

- statické zatěžovací zkoušky, při nichž se vyvozují statické účinky na mostní konstrukci
- dynamické zatěžovací zkoušky, při nichž se vyvozují dynamické účinky na mostní konstrukci

Zkoušky se dále také provádějí, je-li třeba:

- posoudit spolehlivost a jakost mostu
- ověřit výpočtové modely
- posoudit spolehlivost konstrukce mostu, pokud jsou pochybnosti o shodě provedení konstrukce s požadavky návrhu
- posoudit spolehlivost konstrukce v případě, že nebylo možné bezpečně zjistit všechny potřebné parametry pro výpočet při návrhu konstrukce

#### 3.5.2 Zásady a údaje o měření

Měřicí přístroje, metody a postupy zkoušení musí být zvoleny tak, aby splňovaly podmínky nezkresleného zobrazení a odpovídaly požadované přesnosti měření [8]. Zaznamenávají se zejména tyto údaje:

- základní údaje o mostním objektu

- datum měření
- teplota vzduchu, vývoj počasí během měření, rychlost větru apod.
- použité měřicí přístroje a schéma jejich zapojení
- měřené veličiny (posunutí, deformace apod.)
- hmotnostní a geometrické charakteristiky použité zkušební zátěže
- označení jednotlivých zatížení, schéma jejich uspořádání na mostní konstrukci a podmínky působení
- nastavené citlivosti měřicích přístrojů, kalibrování měřených veličin, stavy na měřicích přístrojích při jednotlivých čteních

### 3.5.3 Měřené veličiny

Při zatěžovací zkoušce se měří přetvárné veličiny potřebné k dané zatěžovací zkoušce. Při statické zatěžovací zkoušce je potřeba změřit alespoň:

- svislý průhyb v místech největších očekávaných průhybů nosné konstrukce
- pokles podpěr a zatlačení ložisek

Dále se doporučuje během statické zatěžovací zkoušky sledovat a zaznamenat:

- teplota vzduchu a konstrukce
- poměrná přetvoření v exponovaných místech
- průhybu, posuny a pootočení ostatních důležitých částí konstrukce
- sedání základu
- vodorovné příčné deformace tlačných pásů s otevřeným průřezem
- vznik a rozvoj trhlin

Při dynamické zatěžovací zkoušce se sleduje a zaznamenává:

- časový průběh zátěžových charakteristik sil vnášených do konstrukce při zatížení budiči kmitů s měnitelnou frekvencí, impulzními raketovými motory, buchary apod.

### 3.5.4 Uspořádání zátěže

Zkušební zatížení se uspořádá tak, aby ve vyznačených místech vyvozovalo co největší účinky. Zkouška se uspořádá tak, aby bylo možno porovnat předpoklady skutečného statického působení s předpoklady uvažovanými v návrhu.

Stálé a nahodilé dlouhodobé zatížení má působit na mostní konstrukci před zatěžovací zkouškou nejméně po dobu  $T_1$  a dále pak po celou dobu trvání vlastní zatěžovací zkoušky. Není-li možné po celou dobu zkoušky působení celého stálého zatížení na některou z částí konstrukce, musí se na něj uložit doplňkové zatížení, tak aby bylo dosaženo statického účinku předpokládaného statickým výpočtem.

Pro provedení modální analýzy při dynamické zatěžovací zkoušce se zpravidla používá buzení pomocí budiče kmitů s měnitelnou frekvencí nebo zdroje impulzů. Toto zařízení se umísťuje na konstrukci tak, aby byly vybudeny tvary kmitů v požadovaném frekvenčním rozsahu.

Při dynamické zatěžovací zkoušce s použitím vozidel se přejíždí přes most v obou směrech a jezdí se rychlostmi 5 km/h, 10 km/h, 15 km/h, 20 km/h a dále se rychlost postupně zvyšuje o 10 km/h až do dosažení maximální povolené rychlosti komunikace. Při přejezdech vozidla musí být rychlost stálá.

Při dynamické zkoušce lávek pro chodce nebo cyklisty se provoz na lávce simuluje třemi způsoby:

- náhodné přechody chodců po lávce na úrovni předpokládané hustoty provozu
- chůze dvou osob jdoucích krokovou frekvencí  $f_k$  v rezonanci s některou vlastní frekvencí svislého kmitání lávky  $f_j$

### 3.5.5 Vyhodnocení dynamické zkoušky

Při hodnocení dynamického chování se vychází z porovnání výsledků dynamické zkoušky a dynamického výpočtu mostní konstrukce. Shoda mezi zkouškou a teoreticky stanovenými veličinami je tehdy, když současně platí:

- zkouškou zjištěné frekvence se neliší od teoreticky stanovených frekvencí více, než je uvedeno v Tab. 5
- zkouškou zjištěné vlastní tvary kmitání mají shodný počet uzlových bodů s teoretickými tvary kmitání
- absolutní hodnoty amplitud měřené veličiny zjištěné zkouškou jsou nejvýše rovny 1,1 násobku odpovídajících teoretických hodnot

Frekvence	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_i^{*)}$
Mezní odchylka $\Delta_{(f)} \%$	+5 až -15	+10 až -15	$\pm 15$	$\pm 20$	$\pm 25$
*) Rozumí se pátá a kterákoli vyšší vlastní frekvence.					

Tab. 5 Mezní odchylky vlastních frekvencí

### 3.6 Kritéria pohody chodců dle ČSN EN 1990

Lávky pro chodce jsou velmi citlivé na účinky pohybu chodců, je proto nutné kontrolovat mnoho faktorů, z nichž nejvýznamnější je vlastní frekvence lávky. Pokud vlastní frekvence pro svislá kmitání leží v rozmezí 1 až 5 Hz anebo vodorovné příčné kmitání v rozmezí 0,5 až 2,5 Hz, je nutné dle [5] provést analýzu dynamického chování lávky. Analýza musí obsahovat výpočet vlastní frekvence a tvary kmitání, které se následně porovnávají s přípustnými hodnotami vibrací. Kritéria pohody chodců se stanovují prostřednictvím nejvýše přijatelných hodnot zrychlení kmitání libovolné části nosné konstrukce [8].

- i) 0,7 pro svislá kmitání;
- ii) 0,2 pro vodorovná kmitání od běžné dopravy;
- iii) 0,4 pro vodorovné vibrace od výjimečného zatížení davem lidí.

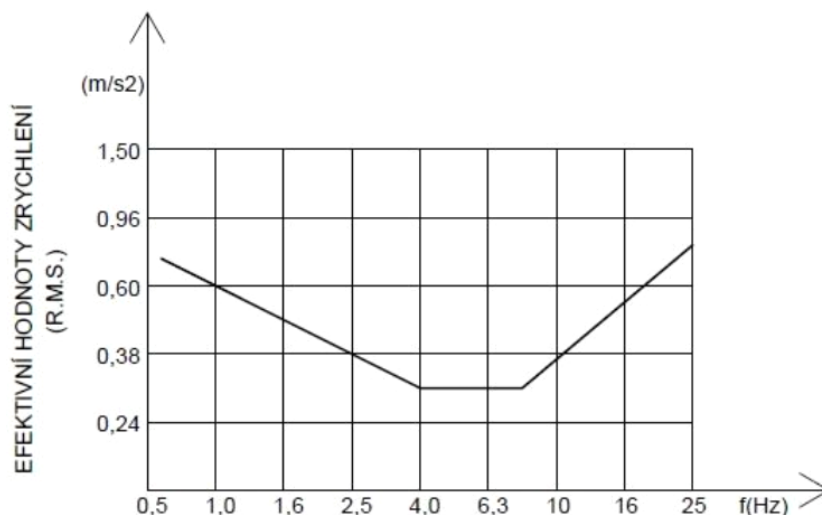
Obr. 9 Doporučené maximální hodnoty zrychlení kmitání

### 3.7 Posouzení dle ČSN 73 6209

Dle [15] se zavádí efektivní hodnota zrychlení svislých vibrací, která je statistickou hodnotou měřící velikost měnících se veličin, tj. amplitud zrychlení kmitání, která je nutná pro vyhodnocení snížené pohody chodců. Pro výpočet efektivní hodnoty zrychlení se používá vzorec:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a^2(t) dt} \quad (4)$$

kde  $a$  je časový záznam zrychlení kmitání v čase  $t$



Obr. 8 Graf snížené hranice pohody chodců dle ČSN 73 6209

### 3.7 Posouzení dle SÉTRA- Technical Guide footbridges

Tento předpis stanovuje čtyři úrovně komfortu. Pro maximální úroveň komfortu dle [4] je zrychlení menší než  $0,5 \text{ m/s}^2$ . Pro střední úroveň komfortu je stanoveno rozmezí zrychlení  $0,5\text{-}1,0 \text{ m/s}^2$ . Pro minimální úroveň komfortu je stanoveno rozmezí zrychlení  $1,0\text{-}2,5 \text{ m/s}^2$ . Zrychlení větší než  $2,5 \text{ m/s}^2$  je považováno jako nepřipustné.

## 4. Zatížení mostů dopravou

V [8] se stanovuje zatížení mostů pozemních komunikací, železničních mostů a lávek pro chodce od dopravy.

### 4.1 Zatížení mostů pozemních komunikací

Modely zatížení definované v normě se mají použít po návrh mostů pozemních komunikací se zatěžovací délkou kratší než 200 m [8]. Modely dále zahrnují všechny běžně předvídatelné dopravní situace, které je potřeba zvážit při návrhu. V normě jsou uvedeny 4 modely svislých zatížení, modely pro vodorovné síly podélné i příčné a 5 modelů zatížení na únavu. Dynamický účinek je zaveden přímo do modelu zatížení a není potřeba zvětšovat zatížení pomocí dynamického součinitele. Modely zatížení se umísťují na vozovku o šířce  $w$ , která se rozdělí do zatěžovacích pruhů o šířce 3 m. Rozdělení do zatěžovacích pruhů je definováno v Tab. 5.

Šířka vozovky $w$	Počet zatěžovacích pruhů	Šířka zatěžovacího pruhu $w_l$	Šířka zbývajících plochy
$w < 5,4 \text{ m}$	$n_l = 1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n_l = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_l = \text{Int} \left( \frac{w}{3} \right)$	3 m	$w - 3 \times n_l$

Tab. 6 Počet a šířka zatěžovacích pruhů

#### 4.1.1 Model zatížení 1 (LM1)

Tento model nahrazuje účinky běžného provozu vyvolané osobními a nákladními vozidly. Používá se hlavně pro celková, ale i lokální ověření konstrukce a skládá se z dvojice náprav, kde každá náprava vyvolává zatížení 300 kN a plošného zatížení 9 kN/m<sup>2</sup>. Toto



zatížení se dále násobí příslušným regulačním součinitelem  $\alpha$ , který záleží na typu komunikace.

Umístění	Dvojnáprava (TS)	Rovnoměrné zatížení (UDL)
	nápravové síly $Q_{ik}$ [kN]	$q_{ik}$ (nebo $q_{rk}$ ) [kN/m <sup>2</sup> ]
Pruh č. 1	300	9
Pruh č. 2	200	2,5
Pruh č. 3	100	2,5
Ostatní pruhy	0	2,5
Zbývající plocha ( $q_{rk}$ )	0	2,5

Tab. 7 Model zatížení 1- charakteristické hodnoty

#### 4.1.2 Model zatížení 2 (LM2)

Model zatížení 2 je charakterizován jednou nápravovou silou o velikosti 400 kN působící na definované dotykové ploše pneumatik. Model zahrnuje dynamické účinky od běžné dopravy na krátkých nosných prvcích. Toto zatížení se násobí příslušným regulačním součinitelem  $\beta$  a je možné ho umístit kdekoli na mostě.

#### 4.1.3 Model zatížení 3 (LM3)

Jde o soustavu nápravových sil představující zvláštní vozidla, která mohou jezdit po trasách, kde je povoleno výjimečné zatížení. Tyto trasy zatím v České republice nebyly stanoveny, a proto se tento model používá na vyžádání příslušného úřadu.

#### 4.1.3 Model zatížení 4 (LM4)

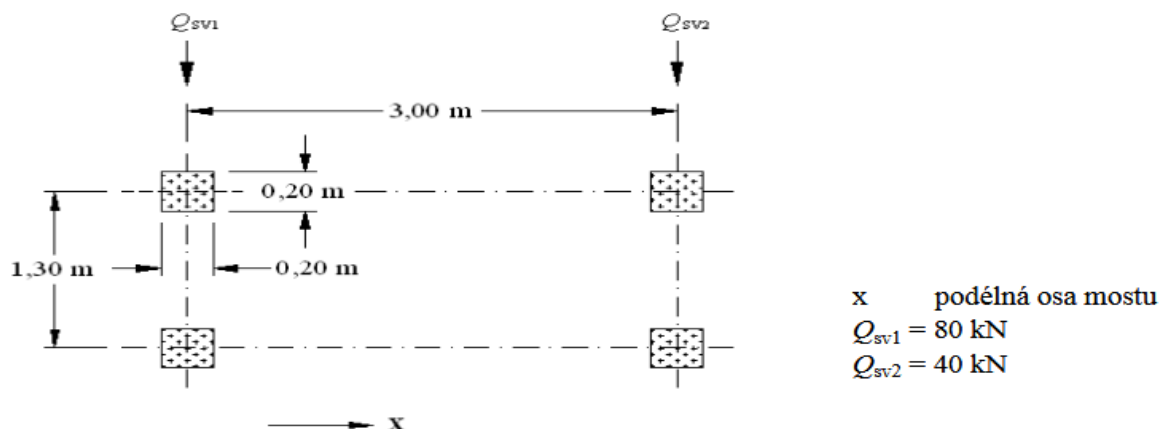
Model zatížení 4 je charakterizován plošným rovnoměrným zatížením od davu lidí o velikosti 5 kN/m<sup>2</sup> a používá se pouze v případech, kdy účinek zatížení není pokryt modelem zatížení 1.

## 4.2 Zatížení chodníků, cyklistických stezek a lávek pro chodce

Podle [8] se stanovují zatížení svislá a vodorovná v trvalých, dočasných i mimořádných návrhových situacích pro chodníky, cyklistické stezky a lávky pro chodce.

### 4.2.1 Svislá zatížení

Pro chodníky a cyklistické pruhy na mostech pozemních komunikací se uvažuje rovnoměrné zatížení  $q_{fk}$ , jehož velikost v národní příloze byla stanovena na  $5 \text{ kN/m}^2$ . U lávek pro chodce je dovoleno zatížení snížit v závislosti na délce lávky a na očekávané hustotě chodců. Dále se na lávkách uvažuje soustředěné zatížení  $Q_{fwk}=10 \text{ kN}$ , které působí na ploše o straně  $0,10 \text{ m}$ . Pokud není zabráněno vjezdu obslužného vozidla, musí se dále uvažovat zatížení od obslužného vozidla o hmotnosti  $12 \text{ t}$  [8].



Obr. 9 Obslužné vozidlo

### 4.2.3 Vodorovná zatížení dopravou

Pro lávky se má uvažovat vodorovná síla  $Q_{flk}$  působící v úrovni vozovky ve směru podélné osy lávky. Charakteristická hodnota vodorovné síly se má rovnat vyšší hodnotě z těchto dvou hodnot:

- 10 % z celkového zatížení odpovídající rovnoměrnému zatížení
- 60 % celkové tíhy obslužného vozidla

## 5. Popis konstrukce

Dřevěná lávka, která byla dokončena v roce 2015, se nachází v obci Příbor a slouží k převedení provozu pro pěší a cyklisty. Lávka je navržena kolmá přes silnici I 58 a je zavěšena na ocelových pylonech přes ocelové tyčové závěsy. Konstrukce je tvořena dvojicí souběžných parapetních obloukových nosníků z lepeného lamelového dřeva, dále pak třech podélníků, které jsou nesený pomocí příčníků. Na podélníky jsou dále ukotveny mostiny z dubového dřeva.



Obr. 10 Dřevěná lávka v obci Příbor

## 5.1 Nosná konstrukce

Hlavní nosná konstrukce je tvořena dvojicí obloukových nosníků o průřezu 220x700 mm se vzepětím 0,91 m, které jsou zavěšeny pomocí tyčových závěsů o průměru 55 mm a 30 mm. Tyto závěsy jsou ukotveny do pylonu o průměru 510 mm, který má délku 16,7 m od paty pylonu. Konstrukce je dále tvořena dřevěnými podélníky o průřezu 120x160 mm, které jsou nesený pomocí příčníků s osovou vzdáleností 2000 mm. Příčníky jsou kotveny do hlavních nosníků pomocí vytvořených úchytů, které zároveň slouží pro ukotvení táhel ztužujících lávku. V místech zavěšení lávky jsou ocelové příčníky uzavřeného obdélníkového průřezu a tloušťce stěny 15 mm. Táhla jsou kloubově připojeny v podélném směru. Zbylé příčníky jsou tvořeny lepeným lamelovým dřevem o průřezu 200x240 mm. Lávka je zavěšena nesymetricky, na jedné straně pomocí čtveřice závěsů o průměru 30 mm a na druhé straně pomocí dvojice závěsů o průměru 55 mm. Mostovka je tvořena pomocí dubových mostin o průřezu 200x70 mm. Mostiny jsou připojeny k podélníkům pomocí dvojice vrutů v každém styčném bodě. Všechny ložiska jsou řešena jako pevná a každé je kotveno pomocí čtveřice šroubů přímo do opěr konstrukce. Jako opěry jsou navrženy železobetonové úhlové zdi s kamenným obkladem. Lávka je založena na hlubinných mikropilotách.



Obr. 11 Pohled na hlavní nosníky





Obr. 12 Pohled na ztužení lávky

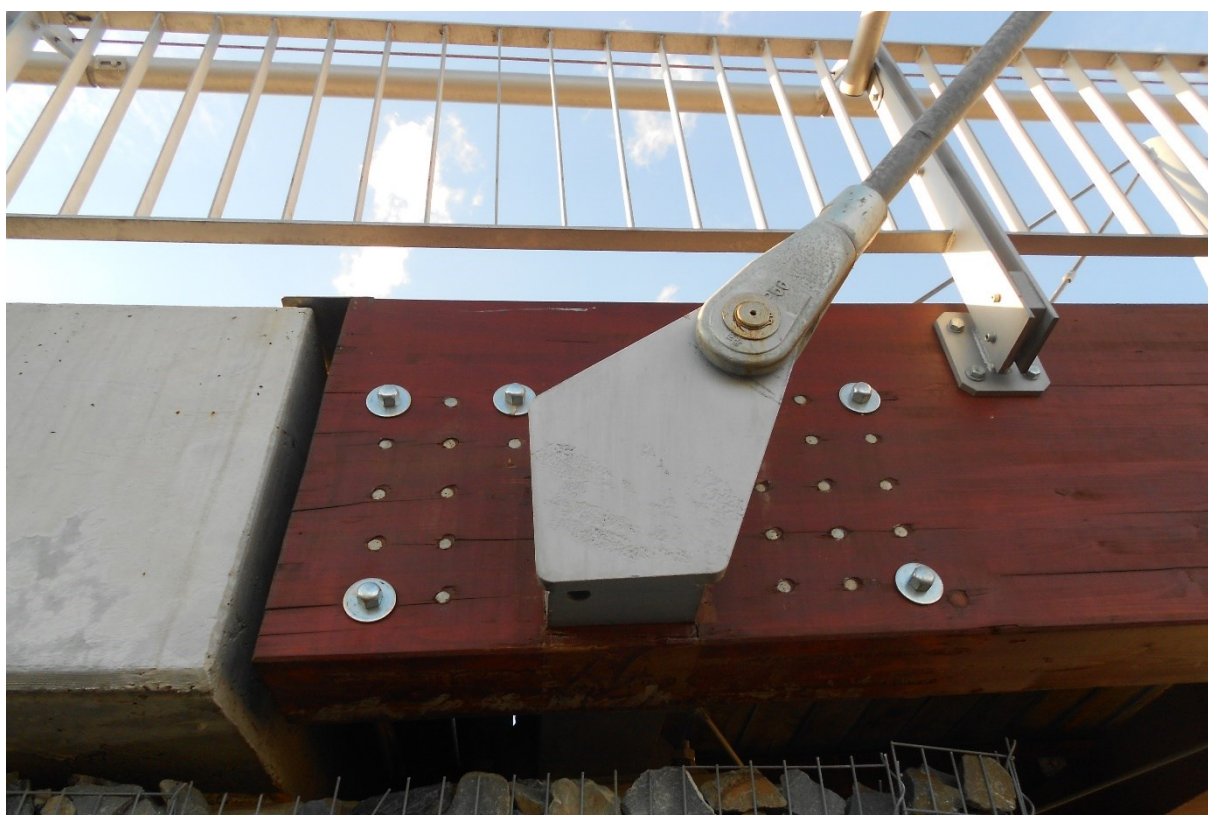


Obr. 13 Pohled na ukotvení příčnicku a ztužidel lávky





Obr. 14 Pohled na zavěšení lávky



Obr. 15 Kloubové připojení závěsu





Obr. 16 Připojení mostin pomocí dvojice vrutů



Obr. 17 Pohled na ložisko lávky

## 6. Výpočet zatížení

Zatížení hlavní nosné konstrukce bylo stanoveno dle [8]. Na konstrukci bylo uvažováno rovnoměrné zatížení chodci, obslužné vozidlo, zatížení větrem a zatížení teplotou.

### 6.1 Stálá zatížení

Vlastní tíha je generovaná pomocí programu Scia Engineer a dále je uvažováno zatížení od zábradlí na každé straně lávky.

Stálá zatížení			
	$g_k$ [kN/m]	$\gamma_G$ [-]	$g_d$ [kN/m]
<b>zábradlí</b>	0,500	1,35	0,675
<b>vlastní tíha</b>	dle programu Scia Engineer		

Tab. 8 Stálá zatížení

### 6.2 Zatížení lávky dopravou

- Svislá zatížení chodci

$$q_{ch} = 2,0 + \frac{120}{L+30} = 2,0 + \frac{120}{43+30} = 3,7 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{fk} = \frac{b_v}{2} \cdot q_{ch} = 1,5 \cdot 3,7 = 5,6 \text{ kN/m}$$

- Obslužné vozidlo

$$Q_{sv1} = 80 \text{ kN}$$

$$Q_{sv2} = 40 \text{ kN}$$

- Brzdné a rozjezdové síly

$$Q_{flk} = \max \begin{cases} 0,1 \cdot q_{fk} \cdot L = 0,1 \cdot 11,1 \cdot 43 = 47,7 \text{ kN} \\ 0,6 \cdot (Q_{sv1} + Q_{sv2}) = 0,6 \cdot (80 + 40) = 72 \text{ kN} \end{cases}$$



$$Q_{flk} = 72 \text{ kN}$$

$$q_{flk} = \frac{Q_{flk}}{L} = \frac{72}{43} = 1,67 \text{ kN/m}$$

### 6.3 Zatížení větrem

- Výchozí základní rychlost větru  $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$
- Součinitel směru větru  $c_{dir} = 1,0$
- Součinitel ročního období  $c_{season} = 1,0$
- Základní rychlost větru  $v_b = v_{b,0} \cdot c_{dir} \cdot c_{season} = 25 \text{ m/s}$
- Výška konstrukce nad terénem  $z_{min} = 2,0 \text{ m} < z = 5 \text{ m} < z_{max} = 200 \text{ m}$
- Součinitel terénu  $k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19$
- Součinitel drsnosti terénu  $c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,87$
- Součinitel ortografie  $c_0(z) = 1,0$
- Střední rychlost větru  $v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 21,75 \text{ m/s}$
- Součinitel turbulence  $k_I = 1,0$
- Intenzita turbulence  $I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = 0,217$
- Měrná hmotnost vzduchu  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$
- Základní dynamický tlak větru  $q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2 = 0,39 \text{ kPa}$
- Maximální dynamický tlak  $q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_m(z)^2 = 0,75 \text{ kPa}$
- Součinitel expozice  $c_e = \frac{q_p(z)}{q_b} = 1,92$

#### 6.3.1 Zatížení větrem ve směru osy y

- Výška vzdorující větru  $d_{tot} = 0,7 \text{ m}$
- Šířka mostu  $b = 3,4 \text{ m}$
- Délka mostu  $L = 43 \text{ m}$
- Poměr šířky mostu ke vzdorující výšce  $b/d_{tot} = 4,8$

- Součinitel síly bez vlivu proudění  $c_{f,x} = c_{fx,0} = 1,3$
- Součinitel zatížení větrem  $C = c_e \cdot c_{fx,0} = 1,92 \cdot 1,3 = 2,5$
- Referenční plocha  $A_{ref,y} = L \cdot d_{tot} = 30,1 \text{ m}^2$
- Zatížení větrem ve směru y  $w_{nk,y} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot d_{tot} = 0,7 \text{ kN/m}$

### 6.3.2 Zatížení větrem ve směru osy z

- Výška vzdorující větru  $d_{tot} = 0,7 \text{ m}$
- Šířka mostu  $b = 3,4 \text{ m}$
- Poměr šířky mostu ke vzdorující výšce  $b/d_{tot} = 4,8$
- Součinitel síly bez vlivu proudění  $c_{f,z} = 0,55$
- Součinitel zatížení větrem  $C = c_e \cdot c_{f,z} = 1,92 \cdot 0,55 = 1,06$
- Referenční plocha  $A_{ref,z} = L \cdot b = 146,2 \text{ m}^2$
- Zatížení větrem ve směru z  $w_{nk,z} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot \frac{b}{2} = 0,7 \text{ kN/m}$

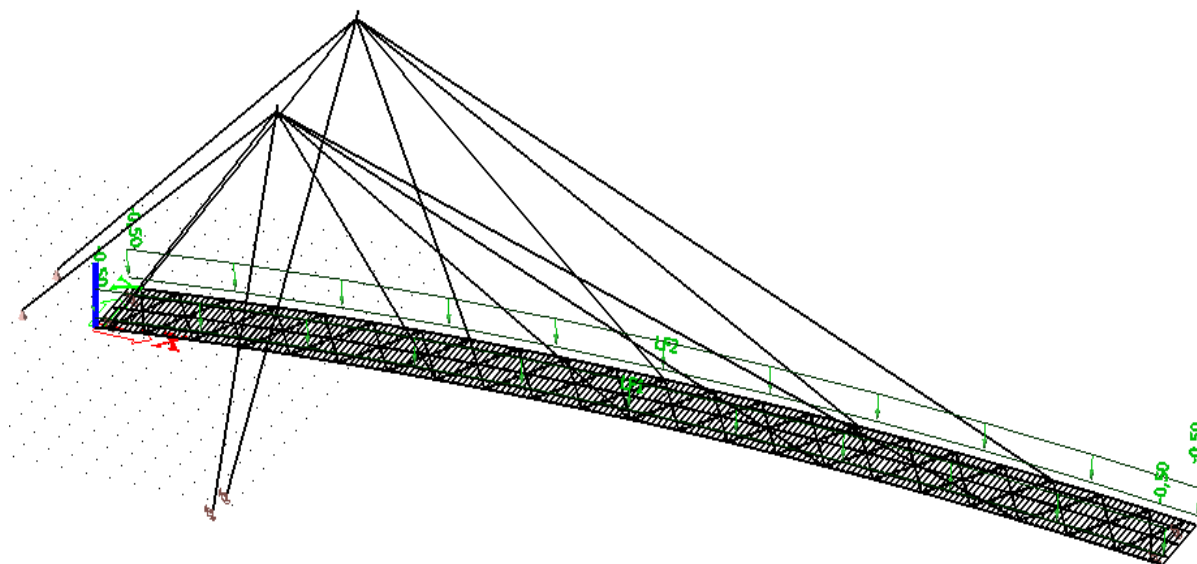
## 6.4 Zatížení teplotou

### 6.4.1 Rovnoměrná změna teploty

- Výchozí teplota konstrukce  $T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$
- Minimální teplota vzduchu ve stínu  $T_{min} = -34 \text{ }^\circ\text{C}$
- Maximální teplota vzduchu ve stínu  $T_{max} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$
- Minimální rovnoměrná teplota mostu  $T_{e,min} = T_{min} + \Delta t_{min} = -34 \text{ }^\circ\text{C}$
- Maximální rovnoměrná teplota mostu  $T_{e,max} = T_{max} + \Delta t_{max} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$
- Charakteristická hodnota ochlazení  $\Delta T_{n,con} = T_{e,min} - T_0 = -44 \text{ }^\circ\text{C}$
- Charakteristická hodnota oteplení  $\Delta T_{n,exp} = T_{e,max} - T_0 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$
- Celkový rozsah rovnoměrné složky teploty  $\Delta T_n = T_{e,max} - T_{e,min} = 72 \text{ }^\circ\text{C}$

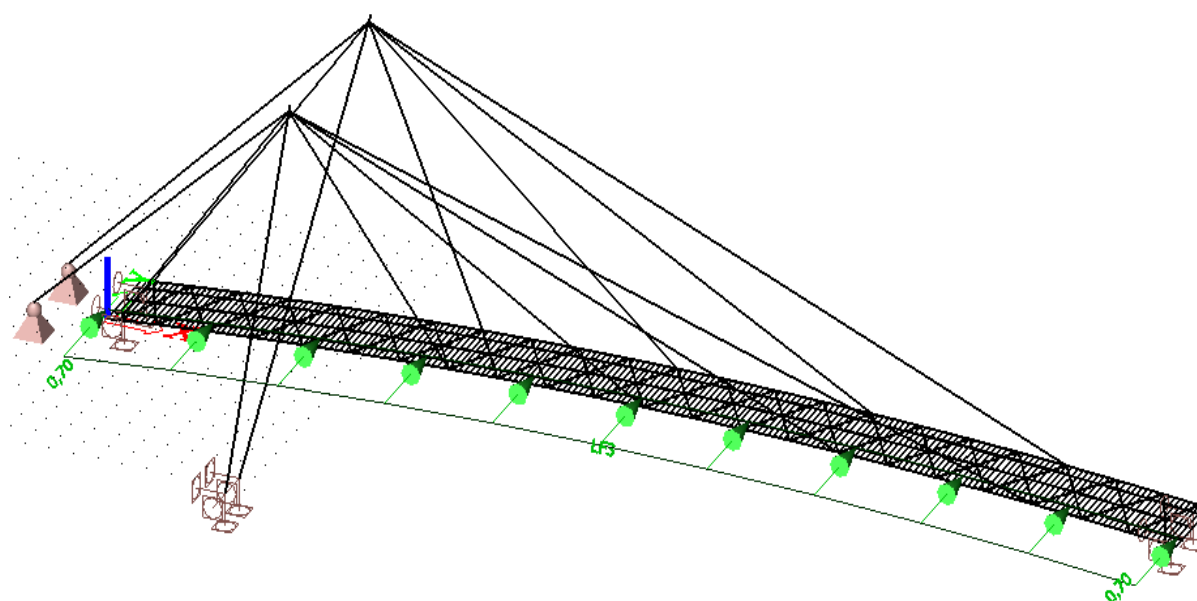
## 6.5 Přehled zatěžovacích stavů

- stálá zatížení- zatížení od ocelového zábradlí



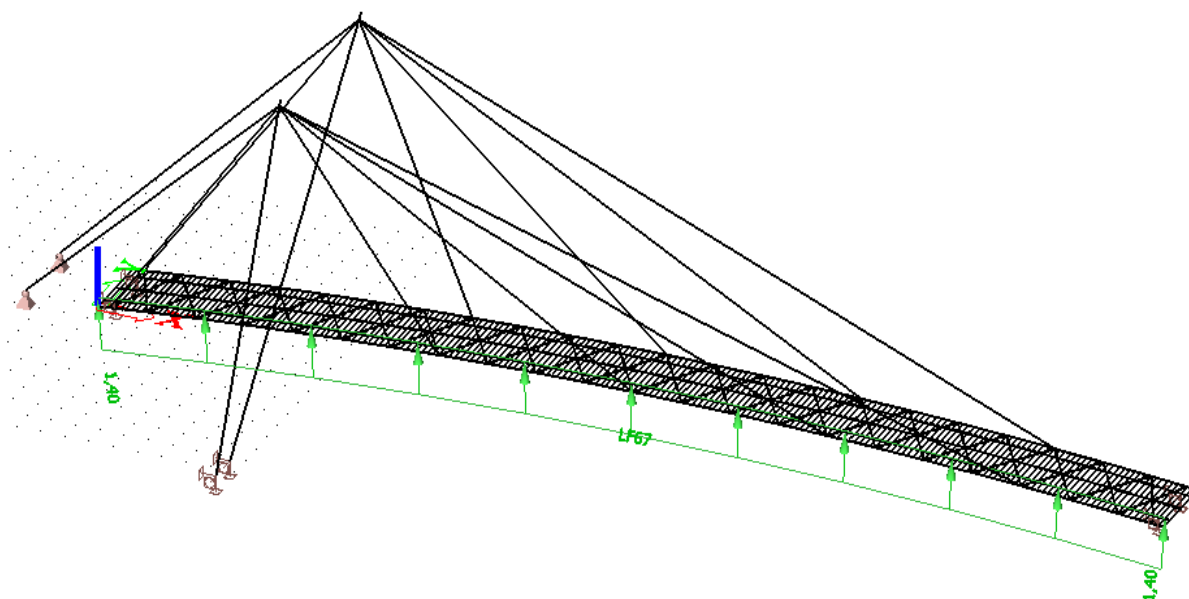
Obr. 18 Zatěžovací stav od stálého zatížení

- vítr ve směru osy y



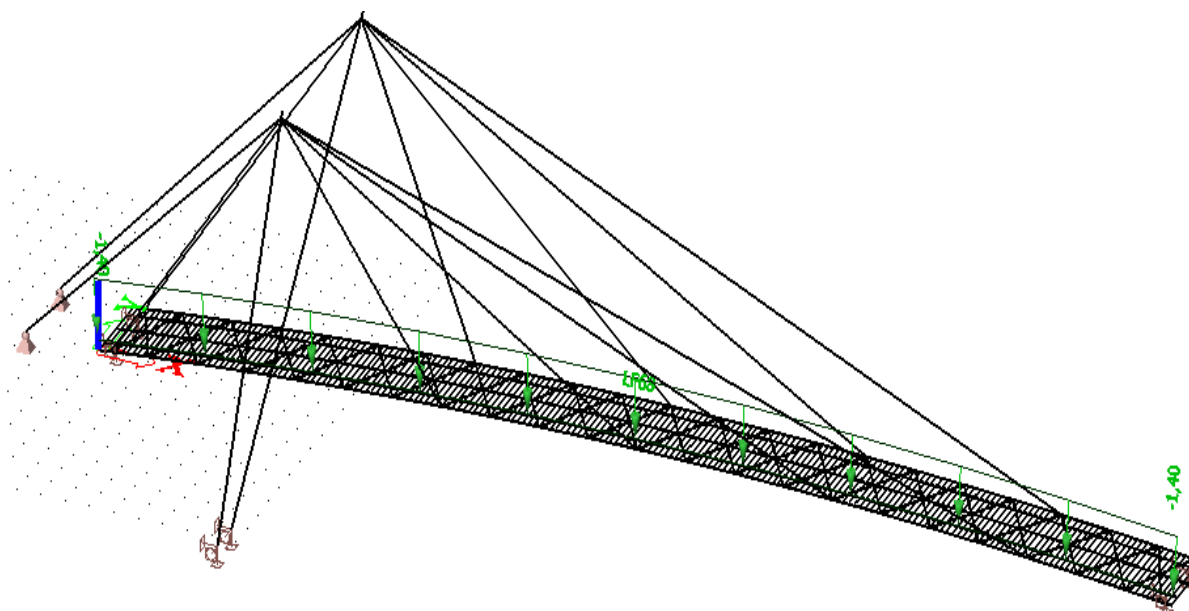
Obr. 19 Zatěžovací stav od větru ve směru osy y

- vítr ve směru z- vztlak



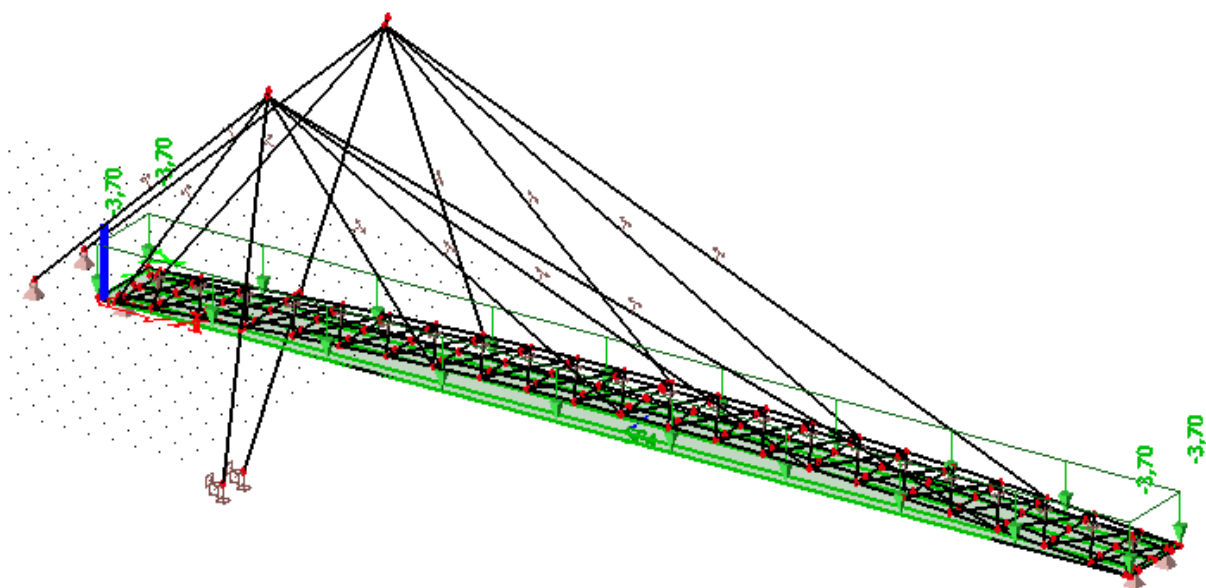
Obr. 20 Zatěžovací stav od větru ve směru osy z- vztlak

- vítr ve směru osy z- tlak



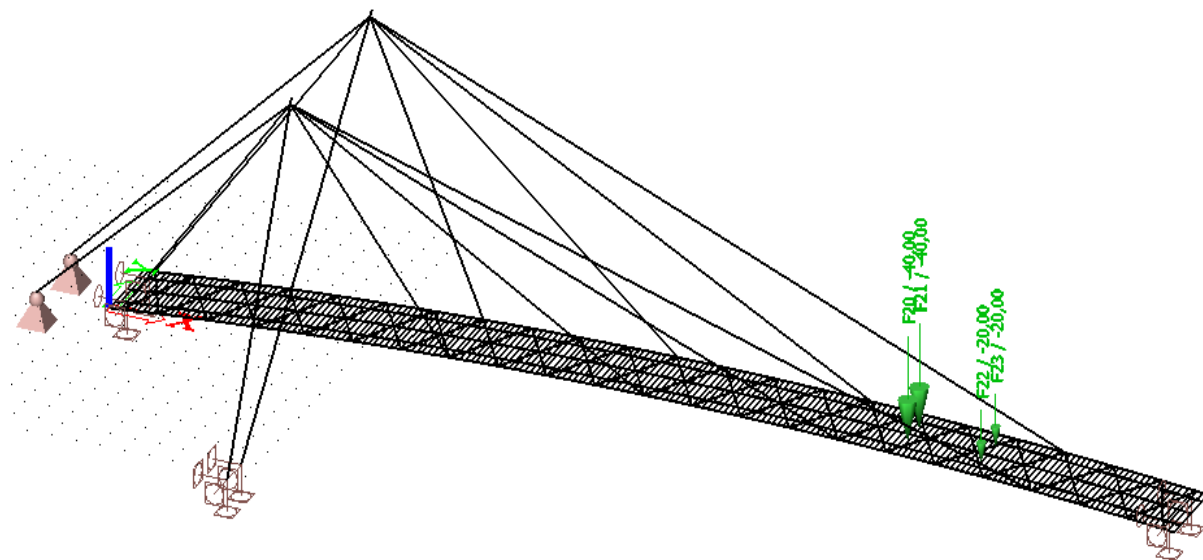
Obr. 21 Zatěžovací stav od větru ve směru osy z- tlak

- svislá zatížení chodci



Obr. 22 Zatěžovací stav od svislého zatížení chodci

- obslužné vozidlo



Obr. 23 Zatěžovací stav od obslužného vozidla

## 7. Statické posouzení konstrukce

Veškeré prvky konstrukce jsou posouzeny dle [9] nebo dle [10] a pro přehlednost této práce je statický posudek přesunut do přílohy č.2 – statické posouzení konstrukce. Každý dřevěný prvek se posuzoval na kombinace při maximálním ohybovém momentu, maximální normálové síle a maximálním krouticím momentu. Ocelové prvky byly posouzeny na kombinaci při maximálním ohybovém momentu, maximální posouvající síle a maximální normálové síle. Vnitřní síly byly převzaty z programu Scia Engineer a veškeré hodnoty lze najít v Tab. 9.

Dílec	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B8	<b>-1018,54</b>	76,27	-35,57	-12,35	149,13	-220,26
B39	468,49	<b>-486,38</b>	-21,56	0,00	29,36	531,13
B36	396,18	<b>600,57</b>	22,44	0,00	22,90	<b>604,25</b>
B921	-400,59	-376,73	<b>-259,67</b>	-10,80	13,89	61,68
B921	-406,66	372,41	<b>263,57</b>	10,35	14,10	60,99
B519	-33,19	-124,29	12,64	<b>-78,08</b>	-15,56	-2,61
B518	-33,32	123,88	-12,66	<b>77,87</b>	-15,90	-2,62
B1	-563,43	-14,18	47,59	0,32	<b>-233,01</b>	22,77
B5	-381,85	-1,06	10,20	-0,29	<b>260,17</b>	1,07
B9	-952,75	-72,39	-55,42	12,03	-172,25	<b>-295,98</b>

Tab. 9 Hodnoty maximálních vnitřních sil

## 8. Experimentální měření konstrukce

Zatěžovací zkoušky jsou vhodným nástrojem pro posouzení jakékoliv konstrukce. Pro reálné posouzení zvolené lávky se provedla dynamická zatěžovací zkouška, která se následně vyhodnotila a porovnála s vytvořeným modelem z programu Scia Engineer. Pro vykonání experimentálního měření bylo potřeba několika měřících přístrojů, které byly zapůjčeny z laboratoří FAST VŠB-TU Ostrava. Byly použity tyto přístroje:

- odporový vlhkoměr
- anemometr UNI-T UT 362
- snímače zrychlení KB12VD
- záznamová stanice SPIDER 8

Experimentální měření se skládalo z dílčích základních měření. Jednalo se především o:

- vizuální prohlídku celé konstrukce,
- geometrické změření jednotlivých prvků konstrukce,
- měření teploty, vlhkosti zvolené konstrukce, rychlosti větru,
- dynamická zatěžovací zkouška.

Vizuální prohlídka nám ukázala, v jakém stavu se lávka nachází. Jelikož se jedná o lávku postavenou v roce 2015, nebyly nalezeny žádné závažné poruchy nebo vady dřeva. Pouze dva z celkového počtu 12 závěsu nebyly správně dopnuty, což má neblahý vliv na dynamické chování lávky, které bylo hlavním cílem experimentálního měření konstrukce. Dále byla zjištěna nefunkčnost osazeného tlumiče, který byl odlišný od navrhnutého tlumiče z projektové dokumentace.



Obr. 24 Tlumič konstrukce

Geometrické změření konstrukce nám ukázalo, že jednotlivé rozměry prvků neodpovídají projektové dokumentaci. Naštěstí jednotlivé prvky byly vždy větší než v projektové dokumentaci, s výjimkou podmostního ztužení, kde byl použit menší průměr táhla, které však i na zmenšený průřez staticky vyhověl.

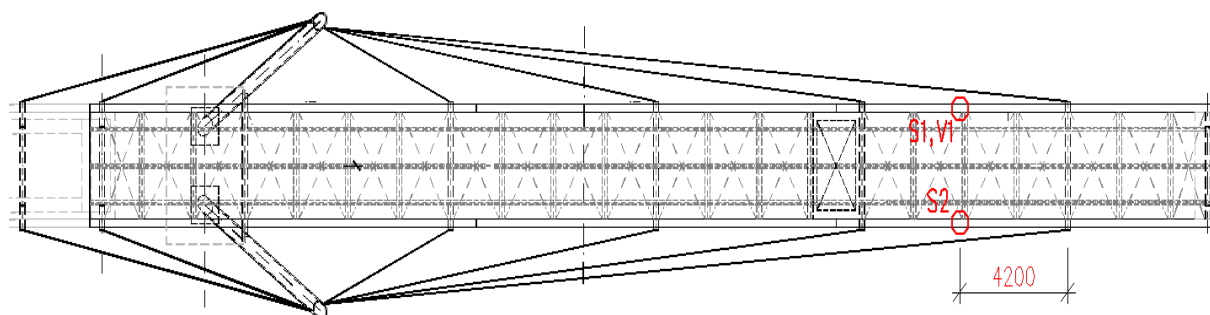
název prvku	z projektové dokumentace [mm]	skutečný rozměr [mm]
hlavní nosník	220 x 700	220 x 700
podélník	120 x 160	120 x 160
dřevěný příčník	200 x 240	200 x 240
ocelový příčník	200 x 240 x 15	200 x 240 x 15
pylon	φ 457 x 40	φ 510 x 50
závěs č. 1	28	30
závěs č. 2	45	55
ztužidlo	18	12
mostiny	200 x 70	150 x 70

Tab. 10 Porovnání průřezů lávky



Během experimentálního měření byla sledována po celou dobu teplota pomocí bezdotykového teploměru. Dále se sledovala vlhkost konstrukce pomocí odporového vlhkoměru během celého měření. Průběžně se sledovala také rychlost větru, která může ovlivnit výsledky měření. Proto vždy při překročení hodnoty se zkouška vždy zastavila a čekalo se, dokud podmínky nebyly příznivé.

Dynamická zatěžovací zkouška se skládala z několika dílčích měření, aby se následně vyhodnotilo, co je pro danou lávku prospěšnější. Byla zvolena metoda měření zrychlení v čase, ze které bylo poté možno dopočítat vlastní frekvence pomocí rychlé Fourierovy transformace. Pro záznam zrychlení byly použity 3 ks seismických snímačů umístěné vždy na hlavních nosnících. Dva snímače byly umístěny do svislé polohy a jeden do vodorovné polohy pro měření vodorovných amplitud.



Obr. 25 Umístění snímačů během zatěžovací zkoušky



Obr. 26 Snímač zrychlení

## 8.1 Zatěžovací zkouška

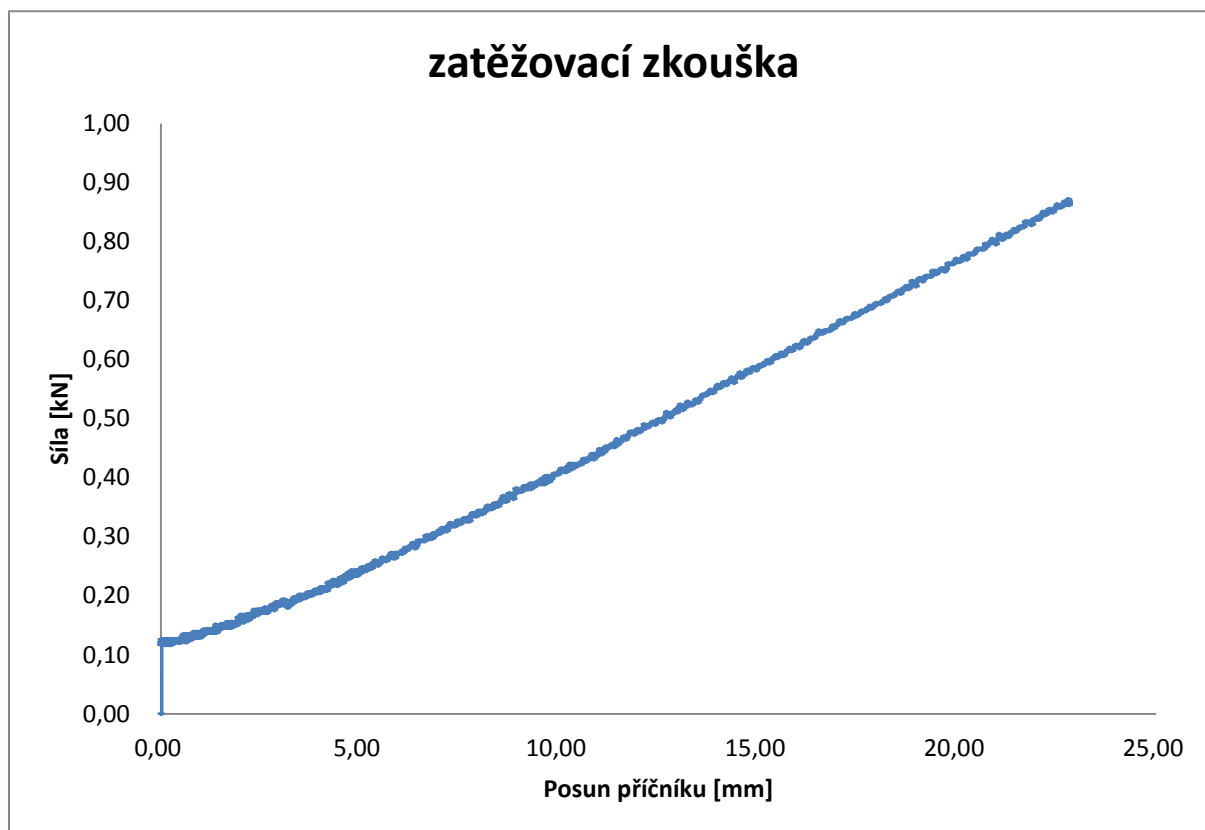
Před samotným měřením byla potřeba vytvořit numerický model konstrukce pro výpočet vlastní frekvence a vlastních tvarů. Model byl vytvořen v několika verzích, a to s tuhými spoji a dále s kloubovým připojením jednotlivých prvků. Oba modely se poté vyhodnotily a určily se místa rozmístění snímačů a reálného zatížení konstrukce, aby se vyvolaly nejnepříznivější podmínky dané konstrukce. V úseku největších pořadnic prvního a druhého vlastního tvaru svislého ohybového kmitání mostovky se osadily snímače zrychlení a zatěžovací těleso nejprve bez tlumiče a poté s vytvořeným tlumičem. Tlumič byl vytvořen jako experiment pro případnou korekci útlumu konstrukce. Jednalo se o svařený rám se čtyřmi pružinami v rozích, který měl nahrazovat nefunkční tlumič konstrukce. Velikost rámu byla shodná s velikostí barelu, který se používal jako zkušební těleso. V rámci experimentu byla provedena statická zatěžovací zkouška pružin, aby se zjistila tuhost tlumiče  $k$ , která vyšla  $k = 39,2\text{--}44,3 \text{ kN/m}$ . Barel se postupně zatěžoval pomocí kameniva o váze 200 kg, 300 kg, 400 kg a 500 kg. Zkouška byla provedena dále v místech A a B, které odpovídaly maximálním pořadnicím prvního a druhého vlastního tvaru.



Obr. 27 Barel s tlumičem



Obr. 28 Tlumič



Obr. 29 Zatěžovací zkouška pružiny

### 8.1.1 Velikost budící síly

Jako budící sílu lze dle [14] použít přirozené zdroje, musí však vyvolat dostatečnou odezvu konstrukce. Byli proto zvoleni dva chodci a celkové váze 200 kg, kteří vytvářeli tyto pohybové aktivity:

- chůze 2 osob frekvencí 1 Hz
- běh 2 osob frekvencí 2 Hz
- vyvození rázu 2 osobami na místě

Zkušební zátěž byla umístěna ve dvou polohách. Poloha A byla ve vzdálenosti 4,2 m od přípoje prvního lana lávky a poloha B byla ve vzdálenosti 9,3 m od stejného místa.

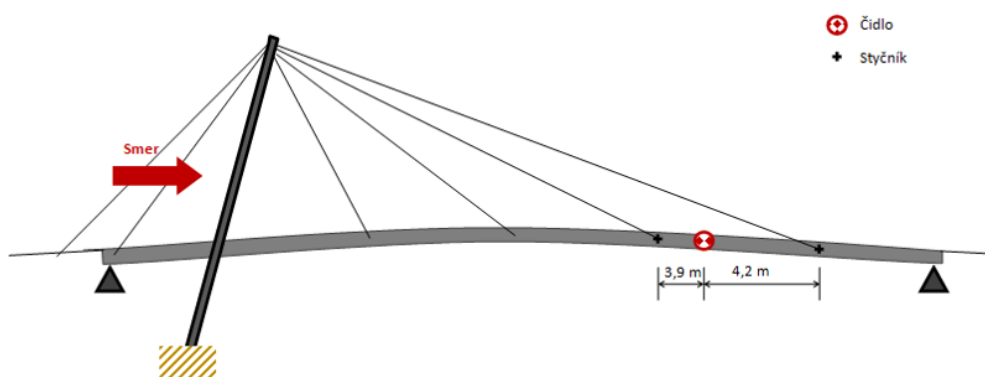
### 8.1.1 Průběh zatěžovací zkoušky

Všechny zatěžovací modely lávky jsou podrobně vyobrazeny v příloze č.1 - Zatěžovací modely. Postupovalo se přesně dle harmonogramu zkoušky, který byl vytvořen před samotným měřením. Zkouška byla provedena dne 6. 6. 2017 a samotné měření začalo v 10:00 a skončilo v 14:00. Průběh jednotlivých zatěžovacích modelů zatěžovací zkoušky je vyobrazen v Tab. 11.

#### 1. VLASTNÍ FREKVENCE LÁVKY BEZ ZATÍŽENÍ (TEPLOTA: 25,15°C)

##### a. Chůze

Čas: 10:05



Obr. 30 Zatěžovací model č. 1

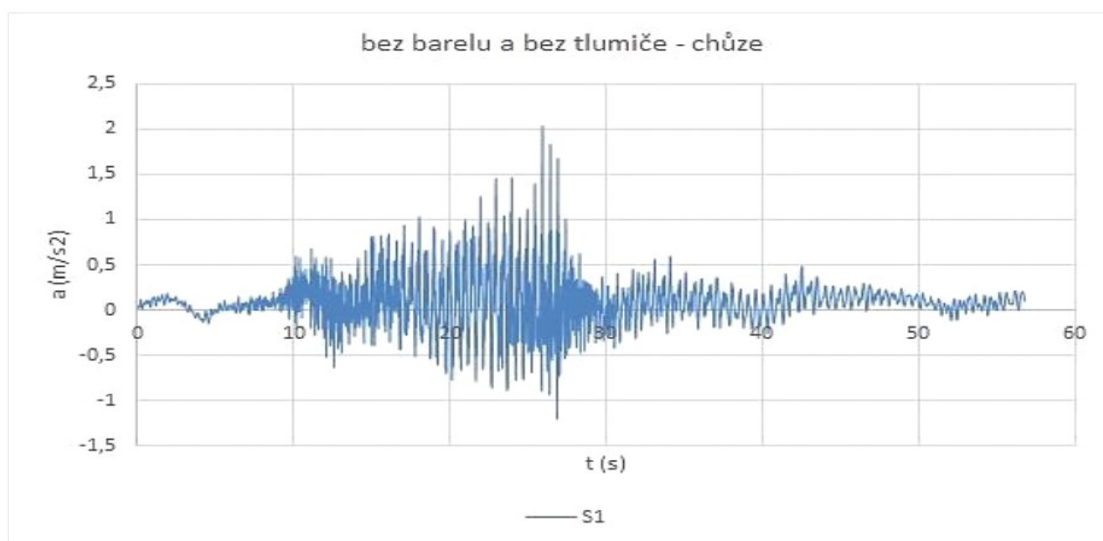


č.	Zatěžovací stav	čas [h]
1a	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz bez barelu	10:05
1b	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz bez barelu	10:13
1c	skok 2 osob bez barelu	10:19
2a1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s barelem 200kg v poloze A	10:47
2a2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s barelem 200kg v poloze A	10:51
2a3	skok 2 osob s barelem 200kg v poloze A	10:54
2b1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s barelem 300kg v poloze A	11:02
2b2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s barelem 300kg v poloze A	11:04
2b3	skok 2 osob s barelem 300kg v poloze A	11:07
2c1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s barelem 400kg v poloze A	11:13
2c2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s barelem 400kg v poloze A	11:16
2c3	skok 2 osob s barelem 400kg v poloze A	11:18
2d1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s barelem 500kg v poloze A	11:24
2d2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s barelem 500kg v poloze A	11:26
2d3	skok 2 osob s barelem 500kg v poloze A	11:28
3a1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s barelem 500kg v poloze B	11:55
3a2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s barelem 500kg v poloze B	11:58
3a3	skok 2 osob s barelem 500kg v poloze B	12:00
3b1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s barelem 300kg v poloze B	12:13
3b2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s barelem 300kg v poloze B	12:16
3b3	skok 2 osob s barelem 300kg v poloze B	12:18
4a1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s tlumičem a barelem 200kg v poloze B	12:41
4a2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s tlumičem a barelem 200kg v poloze B	12:45
4a3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 200kg v poloze B	12:47
4b1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s tlumičem a barelem 300kg v poloze B	12:57
4b2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s tlumičem a barelem 300kg v poloze B	12:59
4b3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 300kg v poloze B	13:02
4c1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s tlumičem a barelem 400kg v poloze B	13:08
4c2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s tlumičem a barelem 400kg v poloze B	13:10
4c3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 400kg v poloze B	13:12
5a1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s tlumičem a barelem 400kg v poloze A	13:21
5a2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s tlumičem a barelem 400kg v poloze A	13:24
5a3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 400kg v poloze A	13:26
5b1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s tlumičem a barelem 300kg v poloze A	13:32
5b2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s tlumičem a barelem 300kg v poloze A	13:35
5b3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 300kg v poloze A	13:37
5c1	chůze 2 osob frekvencí cca 1Hz s tlumičem a barelem 200kg v poloze A	13:45
5c2	běh 2 osob frekvencí cca 2 Hz s tlumičem a barelem 200kg v poloze A	13:46
5c3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 200kg v poloze A	13:49

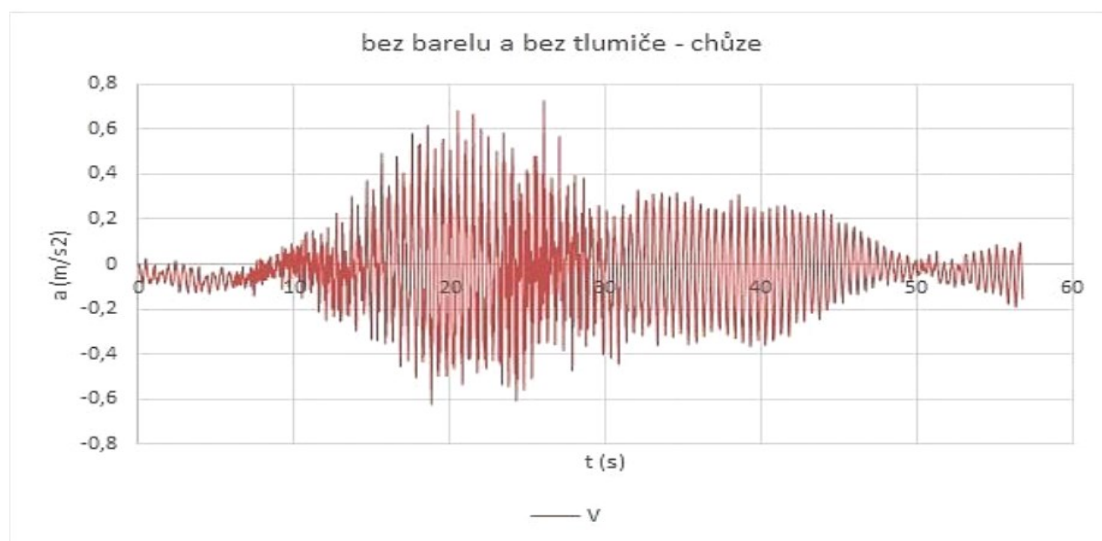
Tab. 11 Zatěžovací modely experimentálního měření

## 8.2 Výsledky dynamické zatěžovací zkoušky

Při dynamické zkoušce byly sledovány velikosti zrychlení v čase od vynuceného kmitání při jednotlivých zatěžovacích modelech. Velikost zrychlení se poté porovnály s [5], kde jsou uvedeny maximální hodnoty zrychlení od běžného provozu. Maximální velikost zrychlení od svislého kmitání je  $a_{\max,s} = 0,7 \text{ m/s}^2$  a od vodorovného kmitání je  $a_{\max,v} = 0,2 \text{ m/s}^2$ . Všechny grafy jsou přehledně zobrazeny v příloze č.3 – Grafy z experimentálního měření.



Obr. 31 Graf zrychlení od svislého kmitání bez barelu a tlumiče



Obr. 32 Graf zrychlení od vodorovného kmitání bez barelu a tlumiče

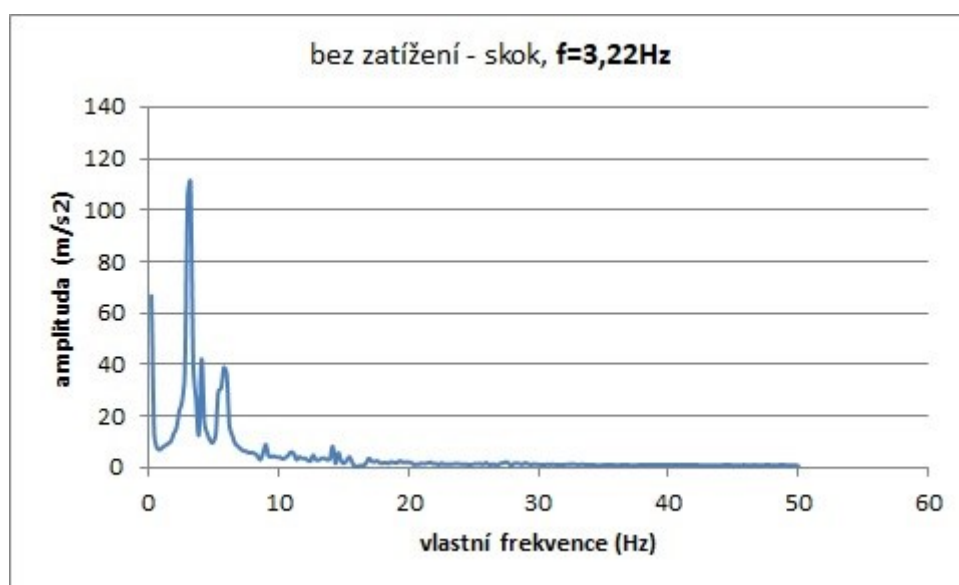
č.	Zatěžovací stav	vl.frekv. [Hz]	zrychlení $a$ [m/s <sup>2</sup> ]					
			S1-max	S1-min	V-max	V-min	S2-max	S2-min
1a	chůze 2 osob bez barelu	3,22	2,03	-1,20	0,72	-0,62	1,30	-0,84
1b	běh 2 osob bez barelu	3,22	3,05	-3,01	1,35	-1,33	2,10	-2,55
1c	skok 2 osob bez barelu	3,22	4,80	-11,72	2,35	-10,98	5,48	-6,70
2a1	chůze 2 osob s barelem 200kg v poloze A	3,25	1,19	-1,18	0,66	-0,82	1,15	-1,37
2a2	běh 2 osob s barelem 200kg v poloze A	3,25	3,41	-2,96	1,44	-1,52	3,67	-3,02
2a3	skok 2 osob s barelem 200kg v poloze A	3,25	3,45	-4,23	1,08	-0,68	3,05	-2,25
2b1	chůze 2 osob s barelem 300kg v poloze A	3,28	0,97	-1,17	0,75	-0,83	1,10	-1,42
2b2	běh 2 osob s barelem 300kg v poloze A	3,28	3,60	-3,16	2,23	-1,90	3,97	-3,53
2b3	skok 2 osob s barelem 300kg v poloze A	3,28	3,45	-3,92	1,80	-3,58	2,70	-3,52
2c1	chůze 2 osob s barelem 400kg v poloze A	3,25	1,42	-1,24	0,82	-0,68	1,41	-1,38
2c2	běh 2 osob s barelem 400kg v poloze A	3,25	2,72	-3,77	0,82	-0,85	2,56	-4,29
2c3	skok 2 osob s barelem 400kg v poloze A	3,25	2,77	-3,72	1,31	-5,15	2,85	-3,00
2d1	chůze 2 osob s barelem 500kg v poloze A	3,12	1,47	-1,40	0,87	-0,80	1,53	-1,38
2d2	běh 2 osob s barelem 500kg v poloze A	3,12	3,23	-3,35	1,56	-1,43	3,34	-3,45
2d3	skok 2 osob s barelem 500kg v poloze A	3,12	2,82	-2,87	1,96	-0,70	2,66	-2,93
3a1	chůze 2 osob s barelem 500kg v poloze B	3,16	1,27	-1,25	0,73	-0,77	1,57	-1,14
3a2	běh 2 osob s barelem 500kg v poloze B	3,16	4,14	-3,38	1,80	-2,06	3,62	-3,61
3a3	skok 2 osob s barelem 500kg v poloze B	3,16	2,48	-3,40	1,44	-0,74	2,92	-3,10
3b1	chůze 2 osob s barelem 300kg v poloze B	3,13	1,75	-1,19	0,54	-0,72	1,59	-1,03
3b2	běh 2 osob s barelem 300kg v poloze B	3,13	3,21	-3,26	1,32	-1,59	3,75	-3,76
3b3	skok 2 osob s barelem 300kg v poloze B	3,13	2,48	-2,72	1,61	-8,88	2,70	-3,05
4a1	chůze 2 osob s tlumičem a barelem 200kg v p.B	3,14	1,51	-1,12	0,48	-0,71	1,30	-1,66
4a2	běh 2 osob s tlumičem a barelem 200kg v p.B	3,14	3,34	-2,85	1,61	-1,52	3,17	-3,62
4a3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 200kg v p. B	3,14	2,18	-2,56	1,69	-9,55	2,60	-3,67
4b1	chůze 2 osob s tlumičem a barelem 300kg v p.B	4,17	1,57	-1,52	0,61	-0,66	1,82	-1,13
4b2	běh 2 osob s tlumičem a barelem 300kg v p.B	4,17	5,21	-3,80	1,69	-1,93	5,25	-4,10
4b3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 300kg v p.B	4,17	2,25	-2,48	1,21	-1,11	1,84	-3,10
4c1	chůze 2 osob s tlumičem a barelem 400kg v p.B	3,63	1,38	-1,63	0,41	-0,56	1,36	-1,30
4c2	běh 2 osob s tlumičem a barelem 400kg v p.B	3,63	5,00	-3,95	1,57	-1,28	4,66	-3,77
4c3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 400kg v p.B	3,63	2,22	-3,04	1,26	-0,80	2,09	-3,11
5a1	chůze 2 osob s tlumičem a barelem 400kg v p.A	2,86	2,10	-1,25	0,72	-0,42	1,61	-1,32
5a2	běh 2 osob s tlumičem a barelem 400kg v p.A	2,86	5,59	-6,64	1,76	-1,76	6,21	-7,08
5a3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 400kg v p.A	2,86	2,20	-3,38	1,43	-1,04	2,25	-3,04
5b1	chůze 2 osob s tlumičem a barelem 300kg v p.A	4,10	1,14	-1,17	0,57	-0,59	1,06	-0,92
5b2	běh 2 osob s tlumičem a barelem 300kg v p.A	4,10	4,78	-3,55	1,97	-2,46	3,41	-3,61
5b3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 300kg v p.A	4,10	2,57	-1,85	1,19	-0,89	2,86	-2,38
5c1	chůze 2 osob s tlumičem a barelem 200kg v p.A	3,08	1,94	-1,38	0,81	-0,89	1,29	-1,29
5c2	běh 2 osob s tlumičem a barelem 200kg v p.A	3,08	2,91	-2,47	1,52	-1,51	2,82	-2,82
5c3	skok 2 osob s tlumičem a barelem 200kg v p.A	3,08	2,20	-2,62	2,27	-1,17	2,32	-2,13
Maximální hodnoty zrychlení			5,59	-11,72	2,35	-10,98	6,21	-7,08

Tab. 12 Velikosti zrychlení a vlastních frekvencí od jednotlivých zatěžovacích modelů

Jak je vidět z Tab.12 hodnoty zrychlení několikrát převyšují maximální hodnoty dle [5] a to zejména při pohybových aktivitách chůze a běh. Z tohoto důvodu lávka nevyhovuje a je nutné navrhnout fungující tlumič, aby se zabránilo těmto nadměrným vibracím.

Následně se z hodnot zrychlení pomocí rychlé Fourierovy transformace se vypočítala vlastní frekvence lávky. V Tab.12 jsou přehledně vypočteny jednotlivé vlastní frekvence lávky. Dle [5] se má posoudit pohoda chodců, pokud je první vlastní frekvence ohybového tvaru menší než 5 Hz a pro torzní tvar menší než 2,5 Hz. Porovnáním těchto hodnot jde vidět, že se musí výpočet konstrukce zabývat také dynamickou analýzou.

Z důvodu nízké vlastní frekvence a překračující hodnoty zrychlení konstrukce lávky je nutné se zabývat návrhem zařízení pro snížení vibrací dané lávky. Útlum konstrukce bude zajištěn návrhem nového funkčního tlumiče.



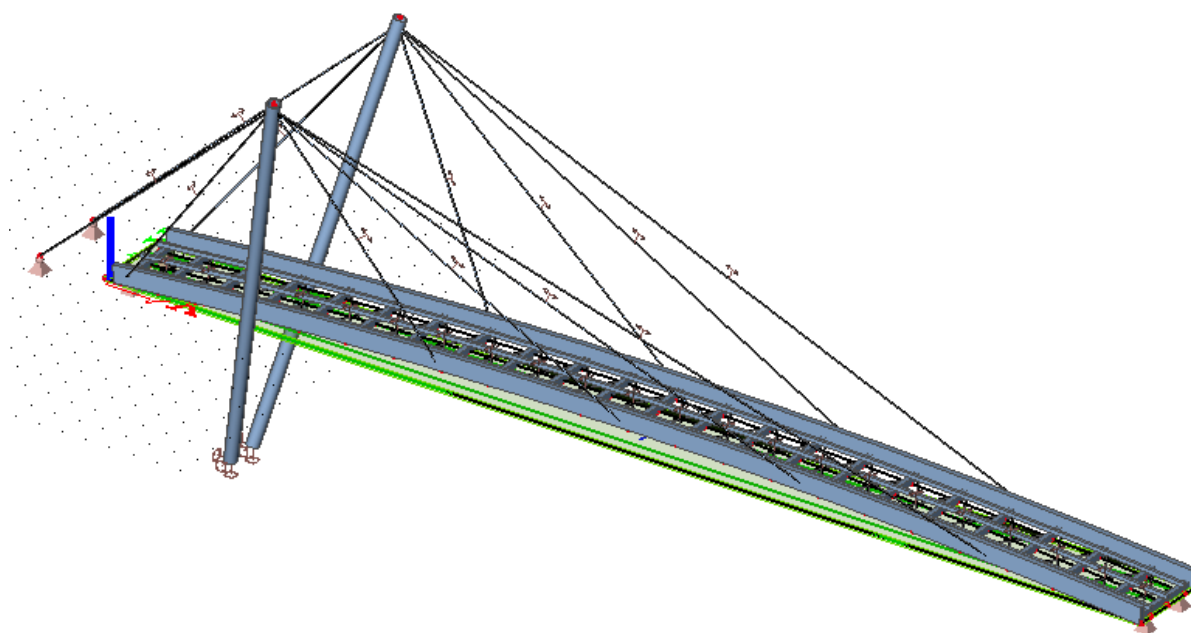
Obr. 33 Graf svislé vlastní frekvence- skok, bez zatížení



## 9. Numerický model konstrukce

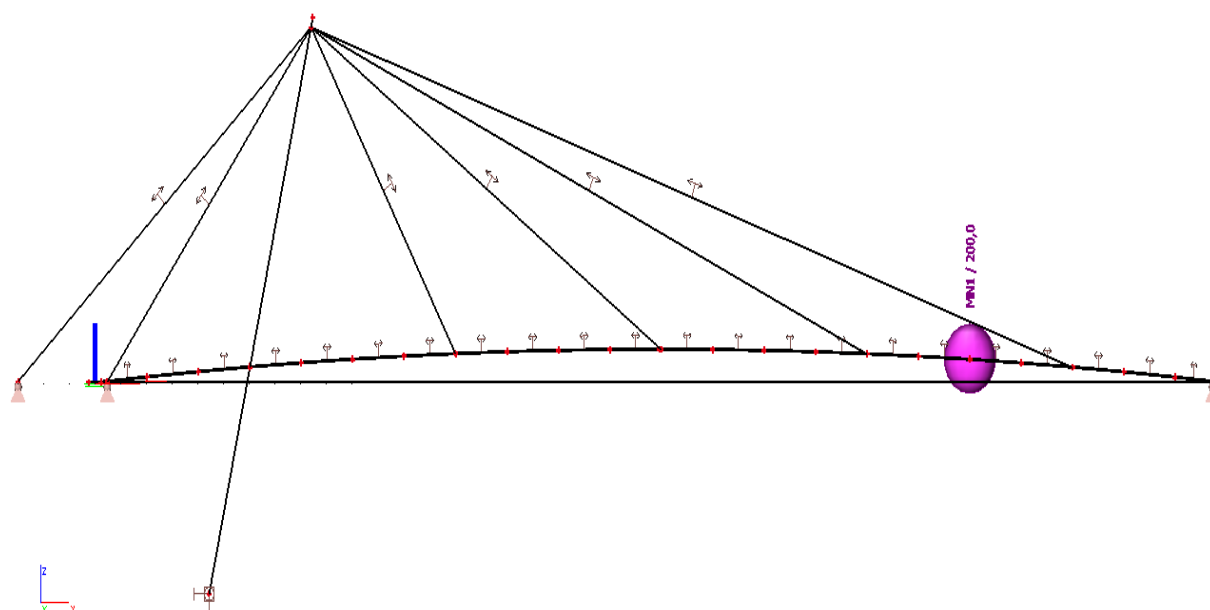
Numerický model byl vytvořen pomocí programu Scia Engineer jako 3D konstrukce z 1D prvků. Ke každému prvku byl přiřazen příslušný průřez a materiál, ze kterého byl vytvořen. V modelu byly vytvořeny tyto okrajové podmínky:

- paty pylonu byly vytvořeny jako vetknuté podpory
- uchycení závěsu jako kloubové uložení ve směru y
- uchycení podélníku jako kloubové uložení ve směru y pomocí nekonečně tuhého prvku
- ložiska konstrukce jako kloubové podpory



Obr. 34 3D model konstrukce

Po zhotovení a zkontrolování modelu se vytvořily skupiny hmot o velikosti hmoty 200 kg, 300 kg, 400 kg a 500 kg v poloze, která odpovídala zatěžovací zkoušce. Kombinace jednotlivých hmot je uvedeno na Obr. 36.



Obr. 35 Skupina hmot 200 kg

Jméno	Skupina hmot	Souč. [-]
<i>*Studentská verze<sup>3</sup> *Studentská verze<sup>3</sup> *Studentská verze<sup>3</sup> *Studentská</i>		
CM1	vlastní tíha	1,00
CM2	vlastní tíha	1,00
	200 kg - Barel 200 Kg	1,00
CM3	vlastní tíha	1,00
	300 kg - Barel 300 kg	1,00
CM4	vlastní tíha	1,00
	400 kg - Barel 400 kg	1,00
CM5	vlastní tíha	1,00
	500 kg - Barel 500 kg	1,00

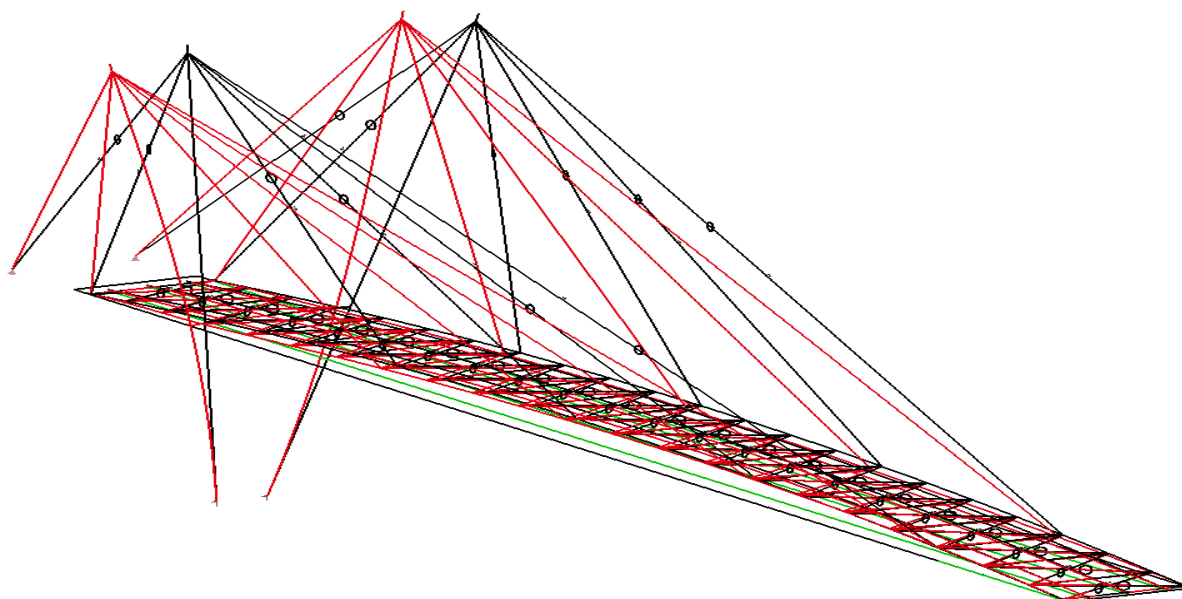
Obr. 36 Kombinace skupiny hmot

Následně se vypočetla vlastní frekvence konstrukce. Výpočet byl proveden pomocí přídatné funkcionality dynamika v programu Scia Engineer. Vlastní frekvence byly vypočteny modální analýzou při užití Lanczosovy metody pro prvních pět vlastních tvarů. Konečné hodnoty vlastních frekvencí z jednotlivých kombinací jsou uvedeny v Tab. 12.

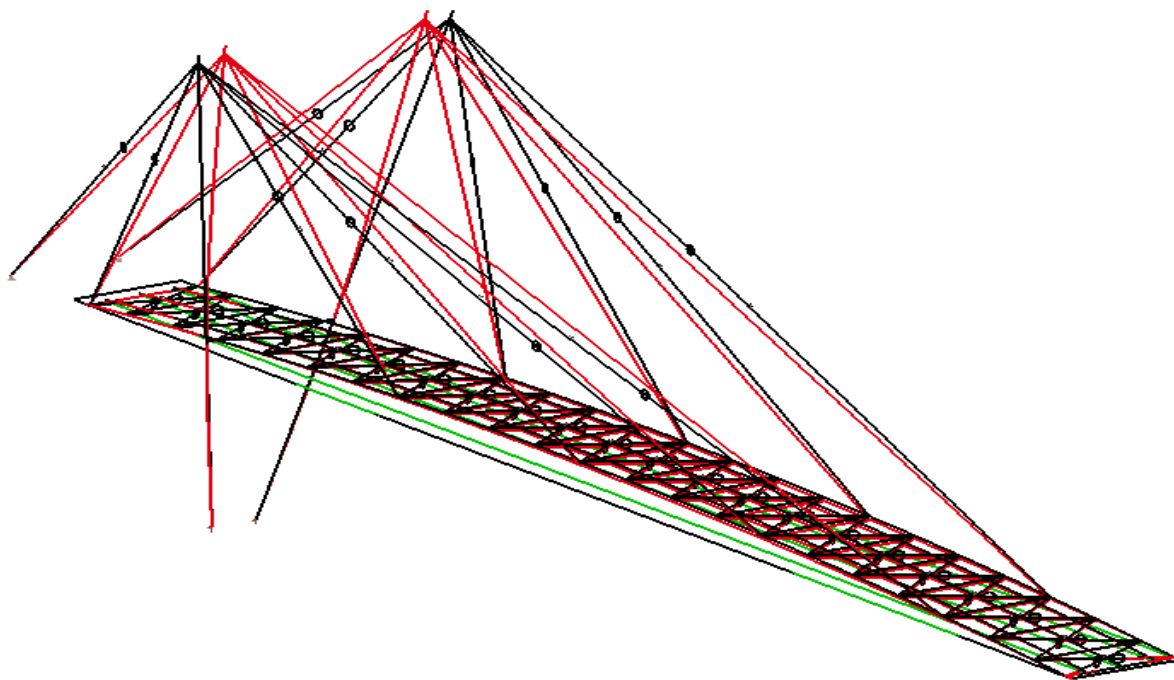
číslo vlastní frekvence	vlastní frekvence [Hz]				
	CM1	CM2	CM3	CM4	CM5
1. vlastní tvar příčného ohybového kmitání	1,84	1,84	1,84	1,84	1,84
1. vlastní tvar svislého ohybového kmitání mostovky	3,01	3,01	3,00	2,99	2,98
1. vlastní tvar kroutivého kmitání	3,19	3,16	3,15	3,13	3,12
2. vlastní tvar svislého kmitání mostovky	4,10	3,99	3,94	3,89	3,84
2. vlastní tvar příčného ohybového kmitání	4,52	4,52	4,51	4,51	4,51

Tab. 13 Vlastní frekvence modelu konstrukce

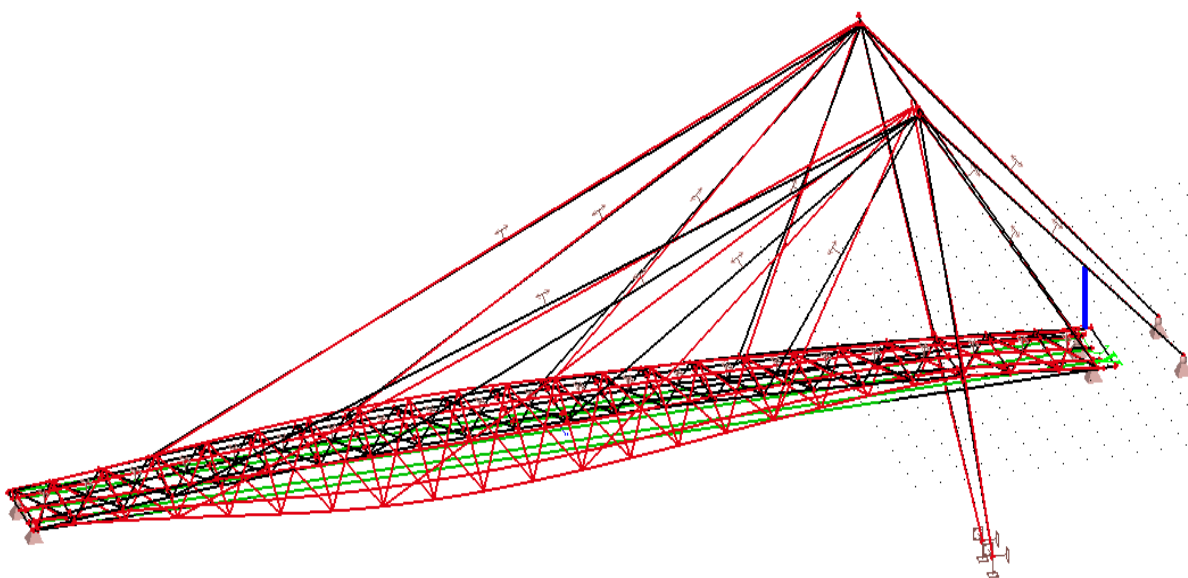
Z výsledků dle Tab. 12 je zřejmé, že první a druhý vlastní tvar ohybové frekvence mostovky se nachází v rozsahu 2,90 Hz až 4,10 Hz, z toho vyplývá, že konstrukce je náchylná na pomalý až rychlý běh. Je tedy nutné navrhnout řešení pro útlum této konstrukce.



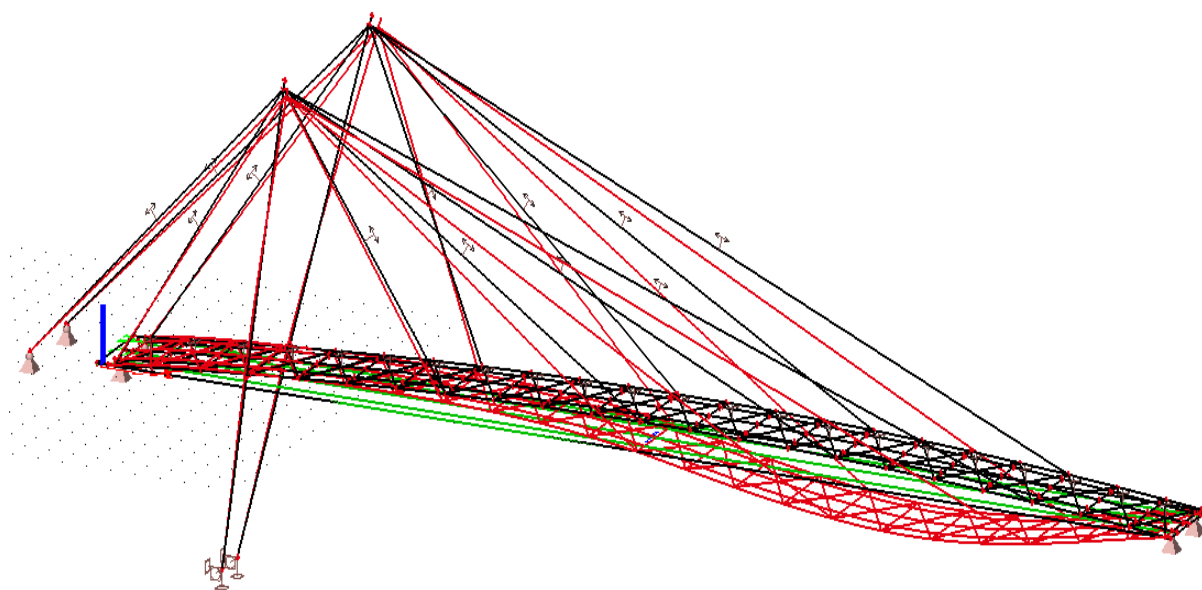
Obr. 37 První vlastní tvar příčného ohybového kmitání pylonu- 1,84 Hz



Obr. 38 Druhý vlastní tvar svislého ohybového kmitání mostovky a pylonu- 3,01 Hz



Obr. 39 Třetí vlastní tvar kroutivého kmitání mostovky - 3,19 Hz



Obr. 40 Čtvrtý vlastní tvar svislého ohybového kmitání mostovky - 4,10 Hz

Numerický model konstrukce byl vytvořen v několika verzích. První verze byla vytvořena s kloubovými přípoji všech dřevěných a ocelových příčníků. U druhé verze se vypočetly hodnoty prokluzu jednotlivých spojů a zjistilo se, že nemají zásadní vliv na výsledné vlastní frekvence lávky. Vlastní frekvence u jednotlivých tvarů se přibližně zvětšila o 0,1 Hz. U tohoto typu konstrukce se zjistilo, že hlavní vliv na vlastní frekvence mají tuhosti jednotlivých pylonů.

### 9.1 Porovnání vlastních frekvencí

Hodnoty vlastních frekvencí modelu se následně porovnaly s naměřenými z experimentálního měření. Vyhodnocení se provedlo dle [15] a bylo zjištěno, že model je přiléhavý k reálné konstrukci lávky.

	vlastní frekvence [Hz]	Procentuální rozdíl [%]
Naměřená hodnota	3,22	6,50
Numerická hodnota	3,01	

Tab. 14 Porovnání vlastních frekvencí

## 10. Návrh opatření

Na základě experimentálního měření a numerického modelu je zřejmé, že je nutné navrhnout tlumení konstrukce. V projektové dokumentaci byl navrhnut tlumič o váze 350 kg, na stavbu byl však instalován tlumič nefunkční, který neplní svůj prvotní účel.

Jedna z možností zlepšení pohody chodců je zvýšení tuhosti konstrukce, jelikož vlastní frekvence je závislá na její hmotnosti a tuhosti. Tento způsob se však špatně realizuje u složitějších konstrukcí z důvodu souběžného zvětšení hmotnosti konstrukce a náročné připojení nových prvků.

Další možností je použití neaktivního tlumiče, tedy přidáním hmoty pod mostovku. Tato hmota je pevně vetknutá do mostovky a slouží především jako závaží proti kmitání lávky. Tento způsob se díky experimentálnímu měření zjistil jako neefektivní z důvodu minimálního snížení zrychlení konstrukce lávky. Při zvyšujícím se zatížení se vlastní frekvence zvyšovala minimálně, a proto se tento typ tlumiče ukázal jako nevhodný, protože by nevyhovělo dle [5]. Instalace neaktivního tlumiče je mnohem levnější než nainstalování aktivního tlumiče, ale u této konstrukce se díky experimentálnímu měření projevil jako neefektivní.

### 10.1 Návrh aktivního tlumiče

Jedna z dalších možností zlepšení pohody chodců je návrh aktivního tlumiče, který se instaluje do místa největší amplitudy (kmitny) konstrukce. Návrh tlumiče se řídí empirickými vzorci dle Den Hartogova řešení [4] v závislosti na celkové hmotnosti lávky a její vlastní frekvenci.

- celková hmotnost mostu  $m_p = 28973 \text{ kg}$
- předpokládaná hmota tlumiče  $m_d = 0,1 \cdot m_p = 0,1 \cdot 28973 \cong 300 \text{ kg}$
- hmotnost kmitající hmoty v daném tvaru  $m_p = 10880 \text{ kg}$

- 
- poměr hmoty tlumiče ke kmitající hmotě  $\mu = \frac{m_d}{m_p} = \frac{300}{10880} = 0,028$
  - frekvence tlumiče  $f_{opt,d} = \frac{f_2}{1+\mu} = \frac{2,90}{1+0,028} = 2,82 \text{ Hz}$
  - poměrný útlum tlumiče  $\xi = \sqrt{3 \cdot \frac{\mu}{8} \cdot (1 + \mu)^3} = \sqrt{3 \cdot \frac{0,028}{8} \cdot (1 + 0,028)^3} = 0,106$
  - tuhost pružiny  $k_d = (2 \cdot \pi \cdot f_{opt,d})^2 \cdot m_d = (2 \cdot \pi \cdot 2,82)^2 \cdot 300 = 94,2 \text{ kN/m}$

Pro zlepšení pohody chodců na lávce se aktivní tlumič projevil jako nejlepší volba. Dle Den Hartogova řešení se navrhl tlumič o velikosti vlastní hmoty 300 kg, vlastní frekvencí tlumiče 2,82 Hz a potřebné tuhosti pružiny 94,2 kN/m. Během experimentálního měření vyšlo zatížení 300 kg se zkušebním tlumičem také jako nejlepší pro zlepšení chování lávky, byly však použity pružiny o poloviční tuhosti.

## 11. Závěr

V dnešní době lávky pro pěší musí splňovat několik kritérií, jedno z hlavních kritérií je, aby esteticky zapadala a nenarušovala ráz krajiny. Dalším kritériem je cena konstrukce, proto se lávky dnes navrhují velmi štíhlé, většinou zavěšené, to je však spojeno s dalšími problémy týkající se jejich dynamického chování a tím většinou snížena pohoda chodců. Po provedení několika experimentálních měření bylo zjištěno, že i v dnešní době je stále málo zkušeností s realizací a návrhem těchto typů konstrukcí, i když jsou hojně navrhovány po celé ČR. Je proto nutné dbát na pravidelné prohlídky a experimentální měření těchto konstrukcí, abychom zjistili jejich chování v čase. Hlavním cílem této zkoušky bylo ověření kmitání a deformace dané konstrukce.

Tato diplomová práce prokázala, že posuzovaná lávka staticky vyhovuje aktuálním normám, avšak má problém s jejím dynamickým chováním. Cílem proto bylo navrhnout opatření, které by zabránilo nadměrnému kmitání. S pomocí experimentálního měření se zjistilo, že nejlepším řešením bude návrh aktivního tlumiče lávky, který se nainstaluje do místa největší kmitny konstrukce. Bylo dokázáno, že v dnešní době s využitím běžně dostupného softwaru na bázi konečných prvků a příslušnými zkušenostmi projektanta, lze navrhovat tento typ konstrukce bezpečně. Tato práce dále přiblížila, jak probíhají experimentální zatěžovací zkoušky lávek pro pěší, ale také dřevěných mostů a jejich následné vyhodnocení a posouzení dle aktuálních norem.



### 13. Seznam použité literatury

- [1] KARMAZÍNOVÁ, J., SÝKORA, K., ŠMAK, M.: Konstrukce a dopravní mosty, VUT Brno
- [2] PETRÁŠ, V.: Analýza dřevěné mostní konstrukce, Bakalářská práce, VŠB-TUO, 2015
- [3] PIRNER, M., FISHER, O.: Dynamika ve stavební praxi, Praha: ČKAIT, 2010
- [4] SÉTRA, Technical Guide Footbridges, Paris, France, 2006
- [5] ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí
- [6] ČSN EN 1991-1-1: Zatížení konstrukcí- Část 1-1: Obecná zatížení
- [7] ČSN EN 1991-1-4: Zatížení konstrukcí- Část 1-4: Zatížení větrem
- [8] ČSN EN 1991-2: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou
- [9] ČSN EN 1993-2: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 2: Ocelové mosty
- [10] ČSN EN 1995-1-1: Navrhování dřevěných konstrukcí- Část 1-1: Obecná pravidla
- [11] ČSN EN 1995-2: Navrhování dřevěných konstrukcí- Část 2: Mosty
- [12] ČSN 73 2030: Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí: Společná ustanovení
- [13] ČSN 73 6221: Prohlídky mostů pozemních komunikací
- [14] ČSN 73 6222: Zatížitelnost mostů pozemních komunikací
- [15] ČSN 73 6209: Zatěžovací zkoušky mostů, Změna Z1

## 14. Seznam použitých programů

- [1] Autocad 2014
- [2] Microsoft Office Excel 2013
- [3] Microsoft Office Word 2013
- [4] Scia Engineer 16

## 15. Seznam příloh

- |             |   |
|-------------|---|
| Příloha č.1 | Zatěžovací modely experimentálního měření |
| Příloha č.2 | Statické posouzení konstrukce             |
| Příloha č.3 | Grafy z experimentálního měření           |

## 16. Seznam výkresové části

- |            |             |         |
|------------|-------------|---------|
| Výkres č.1 | Půdorys     | M 1:100 |
| Výkres č.2 | Podélný řez | M 1:100 |
| Výkres č.3 | Příčný řez  | M 1:100 |